

УДК 61/778.64/57.089.67

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar88645>

Обзорная статья



3D-печать и медицина

С.А. Пелешок, К.П. Головки

Военно-медицинская академия, Санкт-Петербург, Россия

В современных условиях возможности применения в медицине 3D-печати расширяются и она занимает около 11 % мирового рынка аддитивного производства. В Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова и Военном инновационном технополисе «ЭРА» 3D-печать используется для обучения, предоперационного планирования, создания шин и лонгет, изготовления неинвазивных изделий функционального назначения, создания вспомогательных средств профилактики COVID-19.

С целью определения перспектив развития изучен зарубежный опыт применения 3D-печати в медицине за последние 5 лет.

Установлено, что для обучения создается реестр клинических данных по 3D-печати, печатаются 3D-модели для имитирования сопротивления тканей при операции. С помощью предоперационного планирования разделены сиамские близнецы, на 3D-моделях стоп из эластичной смолы врачи обучаются хирургическим операциям, кардиологические модели используются для прогнозирования риска осложнений при транскатетерной имплантации искусственного аортального клапана, а также репетиции операций с врожденными аномалиями сердца. Изготавливаются индивидуальные имплантаты для поясничного и шейного отделов позвоночника, замены поврежденного участка грудной клетки и ребра, фаланги пальца, эндопротезы тазобедренного и коленного суставов. В качестве вспомогательных изделий создаются индивидуальные хирургические инструменты для операций с малой травматичностью, ортопедические стельки, эластичные стенты для уретры и сетчатые стенты трахеи. Для 3D-печати предлагаются новые материалы из полиамида (PA11), полиэфирэфиркетона, сплавов титана, рассасывающегося полимера и биосовместимой смолы. Появилось новое программное обеспечение 3D-печати и усовершенствованы существующие. В стоматологии печатаются персонализированные брекетки и элайнеры. С помощью 3D-печати создаются индивидуальные многослойные политаблетки, умные таблетки, выпускающие лечебные вещества по команде со смартфона, детские жевательные таблетки. В исследовательских целях напечатаны следующие устройства: имитирующие сердечную ткань с датчиками для отслеживания воздействия лекарственных средств и токсинов; прогнозирующие индивидуальную реакцию материала биопсийной опухоли на лечение; диагностирующие некоторые инфекционные заболевания с использованием смартфона и кремниевого микрофлюидного чипа.

Применение 3D-печати в медицине индивидуализирует и повышает качество медицинской помощи.

Ключевые слова: имплантаты; материалы 3D-печати; образование; перспективы развития; предоперационное планирование; программное обеспечение; 3D-лаборатория; 3D-печать в медицине.

Как цитировать:

Пелешок С.А., Головки К.П. 3D-печать и медицина // Известия Российской Военно-медицинской академии. 2022. Т. 41. № 3. С. 325–333. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar88645>

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar88645>

Review Article

3D printing and medicine

Stepan A. Peleshok , Konstantin P. Golovko

Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

In modern conditions, the possibilities of using 3D printing in medicine are expanding, and it occupies about 11% of the global additive manufacturing market. At the Kirov Military Medical Academy and the ERA Military Innovation Technopolis, 3D printing is used for training, preoperative planning, the creation of splints, the manufacture of non-invasive functional products, and the creation of COVID-19 prevention aids.

In order to determine the prospects for development, foreign experience in the use of 3D printing in medicine has been studied over the past 5 years.

It is established that a register of clinical data on 3D printing is being created for training, 3D models are being printed to simulate tissue resistance during surgery. With the help of preoperative planning, Siamese twins are separated, doctors are trained in surgical operations on 3D models of elastic resin feet, cardiological models are used to predict the risk of complications during transcatheter implantation of an artificial aortic valve, as well as rehearsals of operations with congenital heart anomalies. Individual implants are manufactured for the lumbar and cervical spine, replacement of the damaged area of the chest and rib, finger phalanges, hip and knee replacements. As auxiliary products, individual surgical instruments for operations with low trauma, orthopedic insoles, elastic stents for the urethra and mesh stents of the trachea are created. New materials made of polyamide (PA11), polyesteresterketone, titanium alloys, absorbable polymer and biocompatible resin are offered for 3D printing. There are new 3D printing software and updates of existing ones. Personalized braces and aligners are printed in dentistry. With the help of 3D printing, individual multi-layered polytablets, smart tablets that release medicinal substances on command from a smartphone, children's chewing tablets are created. For research purposes, the following devices have been printed: simulating cardiac tissue with sensors to track the effects of drugs and toxins; predicting the individual response of the biopsy tumor material to treatment; diagnosing some infectious diseases using a smartphone and a silicon microfluidic chip.

The use of 3D printing in medicine individualizes and improves the quality of medical care.

Keywords: 3D printing in medicine; development prospects; education; implants; preoperative planning; software; 3D laboratory; 3D printing materials.

To cite this article:

Peleshok SA, Golovko KP. 3D printing and medicine. *Russian Military Medical Academy Reports*. 2022;41(3):325–333. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar88645>

Received: 17.11.2021

Accepted: 29.11.2021

Published: 30.09.2022

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии (синонимы: трехмерная печать, 3D-печать) в последнее время все чаще находят применение в медицине [1].

Рынок производства 3D-принтеров сейчас динамично развивается и, как ожидается, вырастет с 9,9 млрд долл. в 2018 г. до 42,9 млрд долл. США к 2025 г. Прогнозируется, что объем продаж в 2019–2025 гг. будет расти в среднем на 20–21 %. Отмечается индивидуализация использования технологии. Только в стоматологии, по данным SmarTech, рост рынка в 2020 г. достиг 3 млрд долл. По данным отчета Wohlers Report 2018, медицина занимает 11,3 % мирового рынка аддитивного производства. Согласно исследованию компании Market Research Future (MRFR), совокупные темпы годового роста глобального рынка 3D-печати медицинских устройств в 2018–2023 гг. оцениваются в 18 %. В 2018 г., по данным Healthcare 3D Printing Market Analysis, общий мировой доход от применения медицинских изделий 3D-печати составил 660,4 млн долл.

3D-печать — процесс добавления различных материалов, посредством которых трехмерные физические структуры формируются послойно из компьютерных моделей. Технология создания физических 3D-моделей, а также макетов, изделий, имплантатов в медицине из данных поверхностного сканирования и/или анатомических изображений неинвазивных исследований (компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ)) представляет собой многоэтапный процесс: получение изображения, создание цифровой модели, построение системы поддержек и разрезание модели на слои, трехмерная печать и постобработка в зависимости от способа 3D-печати. Данная технология позволяет печатать множеством материалов, варьирующих от титановых сплавов до коллагена [1].

Выбор направления, метода и материала 3D-печати зависит от того, что подлежит печати. Например, при 3D-печати костных каркасов среди основных направлений (экструзия, фотополимеризация и гранулирование) в первую очередь используются следующие методы: послойного наложения материала (FDM) — 34 %, стереолитография (SLA) — 23 %, реже используются селективное лазерное плавление — 15 % и селективное лазерное спекание (SLS) — 13 % [2].

Медицина стала одной из первых отраслей, которая оценила и начала использовать возможности 3D-печати. Нет ничего более индивидуального, чем тело человека. Поэтому актуальным является производство персонализированных макетов, моделей, имплантатов, инструментов, протезов.

Свидетельством актуальности использования 3D-печати в медицине также является Постановление Правительства Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 1779 о создании в г. Обнинске Калужской

области инновационного научно-технологического центра «Парк атомных и медицинских технологий», где одним из четырех основных направлений деятельности будут аддитивные технологии, новые материалы, лазерные технологии.

Активная деятельность по внедрению 3D-печати в военную медицину осуществляется с участием Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова (ВМедА) и Военного инновационного технополиса (ВИТ) «ЭРА».

В ВМедА с 2017 г. для обеспечения образовательного и клинического процессов работает лаборатория искусственных органов.

В рамках научно-исследовательского кластера в целях поиска, развития и внедрения передовых идей, разработок и технологий в интересах укрепления обороноспособности РФ по научному направлению «Биотехнические системы и технологии» в ВИТ «ЭРА» в 2018 г. создана испытательная лаборатория биомедицинских и аддитивных технологий для изучения технологий 3D-сканирования, цифровой обработки данных КТ, МРТ, моделирования и 3D-печати моделей органов, тканей и предметов медицинского назначения для использования в военной медицине.

Целью исследования является изучение новых направлений в технологии 3D-печати в мире за последние 5 лет для последующей их апробации и внедрения в медицину.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лабораториями 3D-печати в ВМедА и ВИТ «ЭРА» освоены 5 направлений деятельности. Это обучение [3], предоперационное планирование [4], создание шин и лонгет [5], изготовление неинвазивных изделий функционального назначения, создание средств профилактики COVID-19 [6]. Материалы по этим направлениям изложены в реферируемых публикациях, доложены на конференциях, в т. ч. в рамках научно-деловой программы, а также выставочной деятельности международного военно-технического форума «АРМИЯ» в 2017, 2019–2021 гг. [7]. Изданы две методические рекомендации по 3D-печати.

В упрощенном виде технологию 3D-печати в медицине можно продемонстрировать на примере создания шин (лонгет) методом послойного наплавления пластиком, где основные этапы — это получение результатов исследования пациента с помощью КТ и/или поверхностного 3D-сканирования и перевод их в цифровую модель, затем моделирование, 3D-печать и постобработка [5].

Для широкого внедрения в практику 3D-печати проводится обучение и организуется взаимодействие с центральными военно-медицинскими организациями [8, 9]. Для этого задействуются возможности телемедицины, а также с ее помощью организовано получение заявки на печать [10].

Для развития 3D-печати изучены зарубежные разработки¹ и некоторые обзорные публикации за последние 5 лет.

Использование 3D-печати в мировой медицине идет по тем же направлениям и включает: обучение [11–15], предоперационное планирование [13, 15–19], изготовление имплантатов [11, 20–23] и изделий медицинского применения [18, 24–26], а также применение печати в стоматологии [19, 25], фармации [27–29] и с исследовательскими целями [30–37].

С образовательной целью специалисты из Радиологического общества Северной Америки (RSNA) и Американского колледжа радиологии приступили к созданию реестра клинических данных по 3D-печати для доступа к анализу и примерам применения 3D-печати в медицине.

Для имитирования сопротивления тканей при операции на позвоночнике на 3D-принтере напечатаны модели позвонков поясничного и шейного отделов из полилактида (PLA) и поливинилового спирта.

Ученые из Университета Южной Австралии создают из эластичной смолы 3D-модели стоп для обучения врачей хирургическим операциям. Это связано с тем, что в Австралии ежегодно лечат 10 тыс. язв и выполняют около 4,5 тыс. ампутаций.

В Национальном военно-медицинском центре Уолтера Рида (США) на 3D-принтере напечатаны нейроанатомические модели, дающие представление нейрохирургам о сложных структурах кровоснабжения (ncbi.nlm.nih.gov).

Осуществляется печать изделий медицинского назначения, в частности индивидуальных хирургических инструментов для операции с малой травматичностью. Так напечатан биполярный хирургический зажим Вольт для лапароскопических операций для зажима и коагуляции (прижигания) сосудов и тканей (bitegroup.nl).

Ученые из Тайваня на 3D-принтере напечатали ортопедические стельки. Они выполнили 3D-сканирование ступни, создали ее STL-файл, отредактировали его в программном обеспечении (ПО) Autodesk Meshmixer и напечатали на 3D-принтере Infinity X1 по технологии FDM из PLA. Настройку 3D-печати осуществляли в ПО Cura.

Благодаря 3D-печати в Великобритании удалось разделить с помощью предоперационного планирования сямских близнецов. Была создана цифровая модель их мозга, черепа и прилегающих тканей, из мягкого пластика изготовлено несколько напечатанных на 3D-принтере моделей, и после их изучения успешно выполнено оперативное вмешательство.

В Гарвардском университете осуществили 3D-печать кардиологических моделей для прогнозирования риска осложнений при транскатетерной имплантации искусственного аортального клапана и подборе точного размера имплантата.

В США с помощью 3D-печати предоперационного пластикового макета создали отсутствующую трахею из части пищевода у 4-месячного ребенка.

3D Systems с OpHeart на основе MPT с помощью ПО D2P произвели на 3D-принтере ProJet 660 Pro из печатного материала VisiJet 3D-модели для подготовки и репетиции сложных операций у детей с врожденными аномалиями сердца.

DePuy Synthes печатает на 3D-принтере имплантаты CONDUIT Interbody Platform для поясничного и шейного отделов позвоночника, сопоставимые по эластичности с губчатой тканью человеческих костей.

Ученые из Швейцарской высшей технической школы Цюриха представили новое решение — они с экспериментальной целью напечатали на 3D-принтере эластичный стент, который в 40 раз меньше обычных и подходит для пересадки в уретру ребенка.

В Бирмингеме (Великобритания) пересажен напечатанный на 3D-принтере титановый протез для замены поврежденного участка грудной клетки (eos.info).

Специалисты по 3D-печати из Aurora Labs и Университета Западной Австралии создают из титана имплантаты для позвоночника различных форм.

3D-сетчатый стент трахеи из медицинского силикона в виде буквы «С» применили для лечения непроходимости дыхательных путей, вызванной раком горла либо травмой.

В Центре промышленных исследований Квебека используют 3D-печать для создания имплантатов челюсти.

Медицинская компания Conformis (США) представила две модели напечатанных на 3D-принтере индивидуальных имплантатов тазобедренного сустава.

В Болгарии осуществили пересадку напечатанного на 3D-принтере ребра: на основе цифрового изображения кости в 3dbgprint подготовили модель к 3D-печати и напечатали искусственное ребро на 3D-принтере 3DGence из полиамида с отверстиями диаметром 3 мм.

В Нидерландах разработан новый способ полной замены коленного сустава в амбулаторных условиях с помощью 3D-технологий.

По данным КТ с помощью 3D-печати воспроизводили височную кость и на основе ее размеров печатали имплантаты среднего уха для восстановления слуха (RSNA).

В США специалисты Alexander Orthopedic Associates и Additive Orthopedics пересадили пациенту напечатанный на 3D-принтере имплантат кости дистальной фаланги пальца.

В Индонезийском университете изучают возможность 3D-печати 2 фиксаторов из PLA (размер 2 × 5 см) для операций на позвоночнике, располагающихся между позвонками и изменяющих свою форму в зависимости от условий окружающей среды.

Исследователи из Университета Белфаста изучают возможности печати решетки из PLA (ячейка 1 мм) с добавлением 2 % лигнина для лечения ран.

¹ <http://zdrav.expert/index.php>; <https://www.3dpulse.ru/news/>; <https://biomolecula.ru/articles/> и др.

С помощью 3D-печати создаются изделия для исследовательских целей. Роботизированная рука, частично выполняющая функции сурдопереводчика, напечатана в Антверпенском университете (Бельгия). С помощью автоматизированной системы эта рука переводит текст на язык жестов.

Исследователи Гарвардского университета напечатали на 3D-принтере сердце на чипе из полупрозрачного синтетического материала, имитирующего структуру и функции сердечной ткани. В устройстве располагаются микроскопические датчики, способные отслеживать сокращение при воздействии на чип различных лекарственных средств и токсинов, выделяемых различными болезнетворными микроорганизмами. Напечатанное сердце не является имплантатом для человека, а предназначено лишь для проведения научных исследований.

Исследователи из Массачусетского технологического института напечатали на 3D-принтере устройство, которое прогнозирует индивидуальную реакцию материала биопсийной опухоли на лечение.

В США разработан комплекс диагностики инфекционных заболеваний. В качестве детектора используются обычный мобильный телефон и диагностический кремниевый микрофлюидный чип размером с кредитную карточку, созданный с помощью 3D-печати.

Испанская компания Xkelet выпустила на рынок заменитель гипса для печати шин при неосложненных переломах, которые печатаются на 3D-принтере. Заменитель гипса водонепроницаем, не вызывает зуда, легко снимается и может быть использован повторно.

В области стоматологии компания Light Force Orthodontics (США) на основе облачной программы CAD разработала полностью персонализированные напечатанные на 3D-принтере брекеты.

Voodoo Manufacturing изготавливает в течение 5 дней стоматологические элайнеры с помощью 3D-печати для коррекции положения зубов. Другие организации печатают их 3 нед.

Осваивается 3D-печать новых лекарственных форм в фармации. Группа ученых из Университетского колледжа Лондона и другие использовали SLA для 3D-печати многослойных (2 и более) политаблеток в форме цилиндра, кольца и кольца с растворимым наполнителем, характеризующихся индивидуальным подходом и точностью дозирования (mdpi.com).

Ученые доказали целесообразность 3D-печати умных таблеток, передающих данные на смартфон и выпускающих лечебные вещества по команде. В эксперименте устройство способно находиться в желудке в течение месяца.

Британская компания FabRx разработала персонализированные жевательные таблетки для детей с редким нарушением обмена веществ — лейцинозом. Они содержат аминокислотные добавки из изолейцина и валина в соответствии с возрастом, весом и концентрацией

изолейцина в крови. Курс на месяц (28 «принтлетов») печатают 8 мин.

Напечатанные на 3D-принтере таблетки от эпилепсии Spritam (Aprecia Pharmaceuticals) одобрены FDA. Контролируя персонализированное высвобождение лекарств из смеси активных компонентов или многослойных таблеток, можно улучшить их безопасность и эффективность.

Осваивается печать новыми материалами. Shareways предлагает биоразлагаемый материал PA11 на основе нейлона и касторового масла для создания шин, ортезов и протезов методом SLS на оборудовании EOS.

Выполнена печать костных пористых имплантатов из полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) по методу производства способом наплавления нитей (FFF) (FDM). Показано, что SLS менее экономично, чем FFF (FossilLabs).

Evonik представила новый материал VESTAKEEP 3DF на основе ПЭЭК 90 i4G для 3D-печати имплантатов по технологии FFF. Данный материал характеризуется биосовместимостью, биостабильностью и рентгенопрозрачностью.

BellaSeno и Evonik предлагают напечатанные на 3D-принтере имплантаты груди из рассасывающегося полимера RESOMER. Так, например, имплантат Senella постепенно рассасывается в организме и замещается собственными тканями, а имплантаты из силикона заменяются каждые 10–15 лет.

Созданы новые виды биосовместимой смолы Raydent Surgical Guide Resin и Raydent Crown&Bridge Resin для 3D-печати хирургических моделей, коронок и мостов. Сертификат разрешает их применение в организме человека в течение 30 дней (Zortrax).

Ученые из Мельбурнского технологического университета усилили высокочастотными звуковыми волнами на 12 % внутреннюю микроструктуру напечатанных на 3D-принтере сплавов Ti-6Al-4V, используемых для печати имплантатов.

Появились новые программы и обновления существующих. Бесплатная программа Hogos для просмотра рентгеновских снимков, а также изображений, полученных в результате МРТ и КТ, имеет открытый исходный код. Функционирует в части 3D-рендеринга, имеет инструмент визуализации поверхностей. Файлы экспортируют в формат STL для вывода на 3D-печать. Недостаток данного ПО — отсутствие возможности сегментации изображения.

Постоянно обновляется имеющее открытый исходный код ПО Blender.

ПО SketchUp позволяет моделировать различные трехмерные объекты и обладает достаточно широкими возможностями.

Aether выпустил для медицинской визуализации на основе искусственного интеллекта ПО Automatic Segmentation and Reconstruction, осуществляющее автоматизированную сегментацию.

Компания 3D Systems получила для ПО D2P (DICOM-to-PRINT) дополнительное разрешение по форме 510(k) от FDA для использования в кардиологии, нейрохирургии,

челюстно-лицевой хирургии (ЧЛХ), гастроэнтерологии, урологии, неврологии и травматологии.

Британская компания Axial3D создает платформу Axial3D Assure, которая позволяет управлять лабораториями медицинской 3D-печати.

FDA (США) утвердила рекомендации для 3D-печати в медицине. В руководстве, изданном 4 декабря 2017 г., рассмотрены аспекты проектирования и испытания моделей, а также требования к их качеству. Оно содержит разделы по дизайну и процессу производства, испытанию моделей и составлению инструкций.

При создании моделей на основе изображений, например, полученных при КТ-сканировании, должны учитываться минимальное качество изображения и его разрешение, алгоритмы обработки изображений, которые могут изменять размеры модели по сравнению с реальными органами, а также сохранность и определимость анатомических ориентиров, используемых для адаптации модели.

В разделе по испытанию моделей приводятся требования к их описанию, результатам механических испытаний, измерению размеров, характеристикам материала, стерилизации и биосовместимости.

Согласно третьему разделу, каждое устройство должно иметь инструкцию, в которой указаны данные пациента, назначение модели и его окончательный дизайн, а также предупреждение о необходимости предварительного обследования пациента для исключения любых изменений, могущих отличать модель от реальной анатомической структуры.

Оценена экономическая целесообразность содержания медицинской лаборатории 3D-печати в больнице в Манчестере при затратах на программное обеспечение и 3D-принтер PolyJet. В штате лаборатории 3 специалиста, которые работают с 9 консультантами по ЧЛХ при лечении и реабилитации пациентов после рака головы и шеи, лицевой травмы или врожденных аномалий. В среднем больница сталкивается с 20 случаями рака и 8–10 травмами ежегодно.

Перспективы развития 3D-печати в лабораториях ВИТ «ЭРА» и ВМедА связаны с планируемыми печатью имплантатов из порошка титана и его сплавов и биосовместимого ПЭЭК, созданием предоперационных моделей с помощью многоцветной печати, освоением сканирования и моделирования в стоматологии, экспериментальной 3D-биопечатью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карякин Н.Н., Горбатов Р.О. 3D-печать в медицине. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2019. 240 с.
2. Bahraminasab M. Challenges on optimization of 3D-printed bone scaffolds // Biomed. Eng. Online. 2020. Vol. 19, No. 69. P. 1–33. DOI: 10.1186/s12938-020-00810-2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С участием ВМедА и ВИТ «ЭРА» проведены апробация и внедрение в центральные военно-медицинские организации МО РФ персонализированных медицинских изделий, изготовленных с помощью 3D-печати (макеты предоперационных (патологических) органов, шин и лангет, анатомических моделей сложных костей и элементов скелета человека), для использования в предоперационном планировании, обучении, повышении квалификации врачей, реабилитации, что в конечном итоге должно улучшить качество жизни больных после травм и других патологических состояний.

Применение 3D-печати в медицине стремительно расширяется, что похоже на революцию в здравоохранении, и в частности:

- повышает качество образования и постдипломной подготовки врачей;
- улучшает визуализацию с помощью физических моделей органов, подготовку, планирование и клинический исход сложных операций;
- дает возможность персонализированного создания имплантатов;
- индивидуализирует лекарства и медицинские изделия;
- повышает эффективность и производительность труда медицинских работников;
- делает высокотехнологическую медицинскую помощь более доступной.

Медицина становится одной из отраслей, в которой применение технологий 3D-печати получает наибольшее распространение.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Финансирование данной работы не проводилось.

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

Этическая экспертиза. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов изучения.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

3. Кушнарев С.В., Ширшин А.В. Создание трехмерных физических моделей на основе изображений компьютерной томографии (первый опыт) // Известия Российской Военно-медицинской академии. 2018. Т. 37, № 4. С. 53–56.

4. Пелешок А.С., Пелешок С.А. Острый аортальный синдром: новые технологии диагностики, планирования лечения, усовершенствования врачей // *Известия Российской Военно-медицинской академии*. 2020. Т. 39, № S3–5. С. 121–126.
5. Хоминец В.В., Пелешок С.А., Волов Д.А., и др. Технологии 3D-печати в лечении пациентов с травмами и заболеваниями предплечья и кисти // *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2020. № 1(69). С. 113–118.
6. Железняк И.С., Пелешок С.А., Ширшин А.В., и др. Использование технологии 3D-печати для профилактики новой коронавирусной инфекции COVID-19. В сб.: *Состояние и перспективы развития науки по направлению «Биотехнические системы и технологии»*. Сборник статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции. Т. 1. Анапа, 2020. С. 7–14.
7. Лобанова М.И., Овчинников Д.В., Железняк И.С., и др. 3D-печать в медицине // *Известия Российской Военно-медицинской академии*. 2019. Т. 38, № 4. С. 201–206.
8. Хоминец В.В., Кудяшев А.Л. Опыт проведения первого выездного цикла «Принципы лечения переломов костей в военно-медицинских организациях МО РФ» на базе Военного инновационного технополиса ЭРА // *Военно-медицинский журнал*. 2019. Т. 340, № 8. С. 93–94.
9. Есипов А.В., Алехнович А.В., Фокин Ю.Н. Рабочее совещание по аддитивным технологиям в 3-м Центральном военном клиническом госпитале имени А.А. Вишневого // *Военно-медицинский журнал*. 2019. Т. 340, № 12. С. 84–85.
10. Пелешок С.А., Железняк И.С., Овчинников Д.В., и др. Опыт применения аддитивных технологий в военно-медицинских организациях и Военном инновационном технополисе «ЭРА» // *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2019. № 3(67). С. 126–132.
11. Martelli N., Serrano C., Pineau J., et al. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery // *A systematic review Surgery*. 2016. Vol. 159, No. 6. P. 1485–1500. DOI: 10.1016/j.surg.2015.12.017
12. Pucci J.U., Christophe B.R., Sisti J.A., Connolly E.C. Three-dimensional printing: technologies, applications, and limitations in neurosurgery // *Biotechnology Advances*. 2017. Vol. 35, No. 5. P. 521–529. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2017.05.007
13. Tack P., Victor J., Gemmel P., Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review // *Biomed. Eng. Online*. 2016. Vol. 15, No. 1. P. 115. DOI: 10.1186/s12938-016-0236-4
14. Li C., Cheung T.F., Fan V.C., et al. Applications of Three-Dimensional Printing in Surgery // *Surg. Innov.* 2017. Vol. 24, No. 1. P. 82–88. DOI: 10.1177/1553350616681889
15. Crafts T.D., Ellsperman S.E., Wannemuehler T.J., et al. Three-Dimensional Printing and Its Applications in Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery // *Otolaryngol. Head Neck Surg.* 2017. 156, No. 6. P. 999–1010. DOI: 10.1177/0194599816678372
16. Ganguli A., Pagan-Diaz G.J., Grant L., et al. 3D printing for pre-operative planning and surgical training: a review // *Biomed. Microdevices*. 2018. Vol. 20, No. 3. P. 65. DOI: 10.1007/s10544-018-0301-9
17. Lazar H.L. Three-dimensional printing in cardiac surgery // *Enhanced imagery results in enhanced outcomes // J. Card. Surg.* 2018. Vol. 33, No. 1. P. 28.
18. Kaye R., Goldstein T., Zeltsman D., et al. Three dimensional printing: A review on the utility within medicine and otolaryngology // *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 2016. Vol. 89. P. 145–148. DOI: 10.1016/j.ijporl.2016.08.007
19. Louvrier A., Marty P., Barrabé A., et al. How useful is 3D printing in maxillofacial surgery? // *J. Stomatol. Oral Maxillofac. Surg.* 2017. Vol. 118, No. 4. P. 206–212. DOI: 10.1016/j.jormas.2017.07.002
20. Wilcox B., Mobbs R.J., Wu A.M., Phan K. Systematic review of 3D printing in spinal surgery: the current state of play // *J. Spine Surg.* 2017. Vol. 3, No. 3. P. 433–443.
21. Papagelopoulos P., Savvidou O., Koutsouradis P., et al. Three-dimensional Technologies in Orthopedics. // *Orthopedics*. 2018. Vol. 41. P. 12–20. DOI: 10.3928/01477447-20180109-04
22. Javid M., Haleem A. Additive manufacturing applications in orthopaedics: A review // *J. Clin. Orthop. Trauma*. 2018. Vol. 9, No. 3. P. 202–206. DOI: 10.1016/j.jcot.2018.04.008
23. Vaishya R., Vijay V., Vaish A., Agarwal A.K. Threedimensional printing for complex orthopedic cases and trauma: A blessing // *Apollo. Med.* 2018. Vol. 15. P. 51–54.
24. Diment L.E., Thompson M.S., Bergmann J.H.M. Clinical efficacy and effectiveness of 3D printing: a systematic review // *B. M. J. Open*. 2017. Vol. 7, No. 12. Art. e016891. DOI: 10.1136/bmjopen-2017-016891
25. Jacobs C.A., Lin A.Y. A New Classification of Three-Dimensional Printing Technologies: Systematic Review of Three-Dimensional Printing for Patient-Specific Craniomaxillofacial Surgery // *Plast. Reconstr. Surg.* 2017. Vol. 139, No. 5. P. 1211–1220. DOI: 10.1097/PRS.0000000000003232
26. Lal H., Patralekh M.K. 3D printing and its applications in orthopaedic trauma: A technological marvel // *J. Clin. Orthop. Trauma*. 2018. Vol. 9, No. 3. P. 260–268. DOI: 10.1016/j.jcot.2018.07.022
27. Jamróz W., Szafraniec J., Kurek M., Jachowicz R. 3D Printing in Pharmaceutical and Medical Applications — Recent Achievements and Challenges // *Pharm. Res.* 2018. Vol. 35, No. 9. P. 176. DOI: 10.1007/s11095-018-2454-x
28. Goyanes A., Scarpa M., Kamlow M., et al. Patient acceptability of 3D printed medicines // *Int. J. Pharm.* 2017. Vol. 530, No. 1–2. P. 71–78. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2017.07.064
29. Konta A.A., García-Piña M., Serrano D.R. Personalised 3D Printed Medicines: Which Techniques and Polymers Are More Successful? // *Bioengineering (Basel)*. 2017. Vol. 4, No. 4. P. 79. DOI: 10.3390/bioengineering4040079
30. Tack P., Victor J., Gemmel P., Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review // *Biomed. Eng. Online*. 2016. Vol. 15, No. 1. P. 115. DOI: 10.1186/s12938-016-0236-4
31. Kim S.J., Cha Y.H., Lee K.H., Kwon J.-Y. Effect of personalized wrist orthosis for wrist pain with three-dimensional scanning and printing technique: A preliminary, randomized, controlled, open-label study // *Prosthetics and Orthotics International*. 2018. Vol. 42, No. 6. P. 636–643. DOI: 10.1177/0309364618785725
32. Ballard D.H., Trace A.P., Ali S., et al. Clinical Applications of 3D Printing: Primer for Radiologist // *Acad. Radiologist*. 2018. Vol. 25, No. 1. P. 52–65. DOI: 10.1016/j.acra.2017.08.004
33. Li N., Huang S., Zhang G., et al. Progress in additive manufacturing on new materials: a review // *J. Mater. Sci. Technol.* 2019. Vol. 35, No. 2. P. 242–269. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002
34. Liu Y., Rath B., Tingart M., Eschweiler J. Role of implants surface modification in osseointegration: A systematic review // *J. Biomed. Mater. Res.* 2020. Vol. 108, No. 3. P. 470–484. DOI: 10.1002/jbm.a.36829
35. Murr L.E. Strategies for crating living, additively manufactured, open-cellular metal and alloy implants by promoting os-

seointegration, osteoinduction and vascularization: and overview // *J. Mater. Sci. Technol.* 2019. Vol. 35, No. 2. P. 231–241. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.003

36. Ahangar P., Cooke M.E., Weber M., Rosenzweig D. Current Biomedical Applications of 3D Printing and Addi-

tive Manufacturing // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, No. 8. Art. 1713. DOI: 10.3390/app9081713

37. Gong G., Ye J., Chi Y., et al. Research status of laser additive manufacturing for metal: a review // *Journal of Materials Research and Technology.* 2021. Vol. 15. P. 855–884.

REFERENCES

1. Karyakin NN, Gorbatov RO. *3D print in medicine.* Moscow: GEOTAR-Media Publisher; 2019. 240 p. (In Russ.)

2. Bahraminasab M. Challenges on optimization of 3D-printed bone scaffolds. *Biomed Eng Online.* 2020;19(69):1–33. DOI: 10.1186/s12938-020-00810-2

3. Kushnarev SV, Shirshin AV. Creating three-dimensional physical models based on images of computer tomography (first experience). *Russian Military Medical Academy Report.* 2018;37(4):53–56. (In Russ.)

4. Peleshok AS, Peleshok SA. Acute aortic syndrome: new technologies for diagnostics, treatment planning, and medical improvement. *Russian Military Medical Academy Report.* 2020;39(S3–5):121–126. (In Russ.)

5. Khominets VV, Peleshok SA, Volov DA, et al. 3D printing technology in the treatment of patients with injuries and diseases of the forearm and brush. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy.* 2020;1((69)):113–118. (In Russ.)

6. Zheleznyak IS, Peleshok SA, Shirshin AV, et al. Using 3D printing technology for the prevention of a new coronavirus infection COVID-19. In: *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya nauki po napravleniyu "Biotehnicheskoye sistemy i tekhnologii"*. Collection of articles of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Conference. Vol. 1. Anapa; 2020. P. 7–14. (In Russ.)

7. Lobanova MI, Ovchinnikov DV, Zheleznyak IS, et al. 3D-printing in medicine. *Russian Military Medical Academy Report.* 2019;38(4):201–206. (In Russ.)

8. Khominets VV, Kudyashev AL. The experience of the first outbound cycle "The principles of treatment of bone fractures in military medical organizations of the Ministry of Defense of the Russian Federation" on the basis of military innovation technopolis ERA. *Military Medical Journal.* 2019; 340(8):93–94. (In Russ.)

9. Yesipov AV, Alekhovich AV, Fokin YuN. Workshop on additive technologies in the 3rd Central Military Clinical Hospital named after A.A. Vishnevsky. *Military Medical Journal.* 2019;340(12):84–85. (In Russ.)

10. Peleshok SA, Zheleznyak IS, Ovchinnikov DV, et al. Experience of applying additive technologies in military medical organizations and military innovation technopolis "ERA". *Bulletin of the Russian Military Medical Academy.* 2019;3(67):126–132. (In Russ.)

11. Martelli N, Serrano C, Pineau J, et al. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery.* 2016;159(6):1485–1500. DOI: 10.1016/j.surg.2015.12.017

12. Pucci JU, Christophe BR, Sisti JA, Connolly E.C. Three-dimensional printing: technologies, applications, and limitations in neurosurgery. *Biotechnology Advances.* 2017;35(5):521–529. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2017.05.007

13. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online.* 2016;15(1):115. DOI: 10.1186/s12938-016-0236-4

14. Li C, Cheung TF, Fan VC, et al. Applications of Three-Dimensional Printing in Surgery. *Surg Innov.* 2017;24(1):82–88. DOI: 10.1177/1553350616681889

15. Crafts TD, Ellsperman SE, Wannemuehler TJ, et al. Three-Dimensional Printing and Its Applications in Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2017;156(6):999–1010. DOI: 10.1177/0194599816678372

16. Ganguli A, Pagan-Diaz GJ, Grant L, et al. 3D printing for preoperative planning and surgical training: a review. *Biomed Microdevices.* 2018;20(3):65. DOI: 10.1007/s10544-018-0301-9

17. Lazar HL. Three-dimensional printing in cardiac surgery: Enhanced imagery results in enhanced outcomes. *J Card Surg.* 2018;33(1):28.

18. Kaye R, Goldstein T, Zeltsman D, et al. Three dimensional printing: A review on the utility within medicine and otolaryngology. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol.* 2016;89:145–148. DOI: 10.1016/j.ijporl.2016.08.007

19. Louvrier A, Marty P, Barrabé A, et al. How useful is 3D printing in maxillofacial surgery? *J Stomatol Oral Maxillofac Surg.* 2017;118(4):206–212. DOI: 10.1016/j.jormas.2017.07.002

20. Wilcox B, Mobbs RJ, Wu AM, Phan K. Systematic review of 3D printing in spinal surgery: the current state of play. *J Spine Surg.* 2017;3(3):433–443.

21. Papagelopoulos P, Savvidou O, Koutsouradis P, et al. Three-dimensional Technologies in Orthopedics. *Orthopedics.* 2018;41:12–20. DOI: 10.3928/01477447-20180109-04

22. Javaid M, Haleem A. Additive manufacturing applications in orthopaedics: A review. *J Clin Orthop Trauma.* 2018;9(3):202–206. DOI:10.1016/j.jcot.2018.04.008

23. Vaishya R, Vijay V, Vaish A, Agarwal AK. Threedimensional printing for complex orthopedic cases and trauma: A blessing. *Apollo Med.* 2018;15:51–54.

24. Diment LE, Thompson MS, Bergmann JHM. Clinical efficacy and effectiveness of 3D printing: a systematic review. *BMJ Open.* 2017;7(12): e016891. DOI: 10.1136/bmjopen-2017-01689

25. Jacobs CA, Lin AY. A New Classification of Three-Dimensional Printing Technologies: Systematic Review of Three-Dimensional Printing for Patient-Specific Craniomaxillofacial Surgery. *Plast Reconstr Surg.* 2017;139(5):1211–1220. DOI: 10.1097/PRS.0000000000003232

26. Lal H, Patralekh MK. 3D printing and its applications in orthopaedic trauma: A technological marvel. *J Clin Orthop Trauma.* 2018;9(3):260–268. DOI:10.1016/j.jcot.2018.07.022

27. Jamróz W, Szafraniec J, Kurek M, Jachowicz R. 3D Printing in Pharmaceutical and Medical Applications — Recent Achievements and Challenges. *Pharm Res.* 2018;35(9):176. DOI: 10.1007/s11095-018-2454-x

28. Goyanes A, Scarpa M, Kamlow M, et al. Patient acceptability of 3D printed medicines. *Int J Pharm.* 2017;530(1–2):71–78. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2017.07.064

29. Konta AA, García-Piña M, Serrano DR. Personalised 3D Printed Medicines: Which Techniques and Polymers Are More Successful? *Bioengineering (Basel).* 2017;4(4):79. DOI: 10.3390/bioengineering4040079

30. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online*. 2016;15(1):115. DOI: 10.1186/s12938-016-0236-4
31. Kim SJ, Cha YH, Lee KH, Kwon J-Y. Effect of personalized wrist orthosis for wrist pain with three-dimensional scanning and printing technique: A preliminary, randomized, controlled, open-label study. *Prosthetics and Orthotics International*, 2018;42(6):363-643. DOI: 10.1177/0309364618785725
32. Ballard DH, Trace AP, Ali S, et al. Clinical Applications of 3D Printing: Primer for Radiologist. *Acad Radiologist*. 2018;25(1):52-65. DOI: 10.1016/j.acra.2017.08.004
33. Li N, Huang S, Zhang G, et al. Progress in additive manufacturing on new materials: a review. *J Mater Sci Technol*. 2019;35(2):242-269. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002
34. Liu Y, Rath B, Tingart M, Eschweiler J. Role of implants surface modification in osseointegration: A systematic review. *J Biomed Mater Res*. 2020;108(3):470-484. DOI: 10.1002/jbm.a.36829
35. Murr LE. Strategies for creating living, additively manufactured, open-cellular metal and alloy implants by promoting osseointegration, osteoinduction and vascularization: and overview. *J Mater Sci Technol*. 2019;35(2):231-241. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.003
36. Ahangar P, Cooke ME, Weber M, Rosenzweig D. Current Biomedical Applications of 3D Printing and Additive Manufacturing. *Appl Sci*. 2019;9(8):1713. DOI: 10.3390/app9081713
37. Gong G, Ye J, Chi Y, et al. Research status of laser additive manufacturing for metal: a review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:855-884.

ОБ АВТОРАХ

***Степан Андреевич Пелешок**, докт. мед. наук, профессор, вед. научный сотрудник научно-исследовательского центра; адрес: Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9460-8126>; eLibrary SPIN: 3657-9756; Author ID: 878788; Researcher ID: L-3028-2016; e-mail: peleshokvma@mail.ru

Константин Петрович Головко, докт. мед. наук, начальник научно-исследовательского центра; ORCID: 0000-0002-1584-1748; eLibrary SPIN: 2299-6153; Author ID: 299461; Researcher ID: C-6865-2017; e-mail: labws@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

***Stepan A. Peleshok**, M.D., D.Sc. (Medicine), Prof., Leading researcher, Science Research Center; address: 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, 194044, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9460-8126>; eLibrary SPIN: 3657-9756; Author ID: 878788; Researcher ID: L-3028-2016; e-mail: peleshokvma@mail.ru

Konstantin P. Golovko, M.D., D.Sc. (Medicine), Head of the Science Research Center; ORCID: 0000-0002-1584-1748; eLibrary SPIN: 2299-6153; Author ID: 299461; Researcher ID: C-6865-2017; e-mail: labws@mail.ru