

Обзор литературы

@ Кудрявцева Е.В., Ковалев В.В., Закуринова Е.С., Камский Г.В., Попов В.В., 2021

УДК: 681.6:618

DOI: 10.52420/2071-5943-2021-20-1-76-81

БЛИЖАЙШИЕ И ОТДАЛЕННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ 3D-PRINTING В АКУШЕРСТВЕ И ГИНЕКОЛОГИИ

Е.В. Кудрявцева ¹, В.В. Ковалев ¹, Е.С. Закуринова ¹, Г.В. Камский ², В.В. Попов ²

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Израильский институт металлов, Технион, Хайфа, Израиль

Введение. Несмотря на заметный и быстрый прогресс, достигнутый в развитии медицинской 3D-печати в последние годы, об использовании этой технологии в области акушерства и гинекологии известно не так много. **Целью** подготовленного нами обзора научной литературы явилось определение современного уровня развития 3D-печати, обсуждение ближайших и отдаленных перспектив использования этой технологии в акушерстве и гинекологии, анализ ее потенциальных преимуществ и недостатков. **Материалы и методы.** Нами был проведен поиск научной литературы. Трехступенчатый скрининг прошли 378 работ, в результате для итогового научного обзора было отобрано 42 источника. **Результаты и обсуждение.** Основные области, в которых может использоваться объемная печать в акушерстве и гинекологии — это создание симуляционных моделей и обучение студентов, создание анатомических моделей для предоперационной подготовки, печать хирургических инструментов, создание новых лекарственных форм (в том числе трансвагинальных), биопечать органов и тканей. **Заключение.** Представленный литературный обзор позволяет сделать вывод, что 3D-печать в области акушерства и гинекологии — актуальное, набирающее обороты направление. Организация лабораторий 3D моделирования и печати может существенно повысить эффективность обучения студентов и ординаторов. Кроме этого, следует информировать акушеров-гинекологов и хирургов о возможности печати на 3D-принтере хирургических инструментов по индивидуальному дизайну. Это может вдохновить их на воплощение собственных идей и развитие отечественных инновационных разработок. Трехмерная печать лекарственных форм и биопротезов требует более сложных технологических решений и в клинической практике в настоящее время не применяется. Однако, учитывая огромные перспективы данных направлений, следует предусмотреть различные гранты для их развития в России.

Ключевые слова: 3D печать, таз, анатомическая модель.

Цитирование: Ближайшие и отдаленные перспективы 3D-printing в акушерстве и гинекологии / Е. В. Кудрявцева, В. В. Ковалев, Е. С. Закуринова [и др.] // Уральский медицинский журнал. – 2021. – Т. 20, № 1. – С. 76-81. – Doi: 10.52420/2071-5943-2021-20-1-76-81.

Cite as: Closest and long-term prospects of 3d printing for obstetrics and gynecology / E. V. Kudryavtseva, V. V. Kovalev, E. S. Zakurina, et al. // Ural medical journal. – 2021. – Vol. 20 (1). – P. 76-81. – Doi: 10.52420/2071-5943-2021-20-1-76-81.

Рукопись поступила: 20.02.2021. Принята в печать: 03.03.2021

CLOSEST AND LONG-TERM PROSPECTS OF 3D-PRINTING FOR OBSTETRICS AND GYNECOLOGYE.V. Kudryavtseva¹, V.V. Kovalev¹, E.S. Zakurina¹, G. Muller-Kamskii², V.V. Popov²¹ Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russian Federation² Israel Institute of metals, Technion's R&D Foundation, Haifa, Israel

Introduction. Despite the notable and rapid progress in the development of medical 3D printing in recent years, not much is known about the use of this technology in obstetrics and gynecology. **The purpose** of our review of scientific literature was to determine the current level of 3D printing development, discuss the closest and long term prospects for using this technology in obstetrics and gynecology, and analyze its potential advantages and disadvantages. **Materials and methods.** We searched for scientific literature. 378 papers passed a three-step screening, as a result of which 42 sources were selected for the final scientific review. **Results and discussion.** The main areas in which dimensional printing can be used in this area of medicine is the creation of simulation models and training for students, the creation of anatomical models for preoperative preparation, the printing of surgical instruments, the creation of new dosage drug forms (including transvaginal ones), and bioprinting of organs and tissues. **Conclusion.** The presented literary review allows us to conclude that 3D printing in the obstetrics and gynecology is a current rapidly developing direction. The organization of 3D modeling and printing laboratories can significantly increase the efficiency of teaching students and residents. In addition, obstetricians-gynecologists and surgeons should be informed about the possibility of 3D printing surgical instruments according to an individual design. It can inspire them to implement their own ideas and develop domestic innovative developments. Three-dimensional printing of dosage forms and bioprotheses requires more complex technological solutions, and is not yet used in clinical practice. However, given the enormous prospects for these areas, various grants should be envisaged for their development in Russia

Keywords: 3D printing, pelvis, anatomical model.**ВВЕДЕНИЕ**

Технология аддитивного производства, так же называемая 3D-печать (3D-printing), позволяет создавать физические объекты из CAD-моделей (Computer Aided Design — системы автоматизированного проектирования). При этом построение объекта происходит слой за слоем, путем последовательного добавления материала.

3D-печать позволяет изготавливать сложные геометрические объекты из широкого спектра материалов: металлов [1, 2], полимеров [3, 4], керамических материалов [5, 6, 7], продуктов питания и лекарств [8], органических материалов (ткани и органы для человека и животных) [9, 10].

Технологии 3D-печати все чаще применяются для любых типов проектов в области сельского хозяйства, здравоохранения [11-14], автомобилестроения [15-17] и авиационной промышленности [1, 18]. Среди множества практических приложений 3D-печати особо следует отметить несомненный успех этой прорывной технологии в области биологии и медицины [19].

В медицине можно выделить четыре основных направления применения 3D печати: создание анатомических моделей нормальных и измененных органов, изготовление хирургических инструментов, печать лекарственных форм с модифицированным высвобождением препарата, создание имплантов и протезов [12, 19-21].

Однако несмотря на заметный и быстрый прогресс, достигнутый в развитии медицинской 3D-печати в последние годы, об использовании этой технологии в области акушерства и гинекологии известно не так много. **Целью** подготовленного нами обзора научной литературы явилось определение современного уровня развития

3D-печати, обсуждение ближайших и отдаленных перспектив использования этой технологии в акушерстве и гинекологии, анализ ее потенциальных преимуществ и недостатков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нами был проведен поиск научной литературы в базах PubMed, ScienceDirect, SpringerNature, Taylor&Francis и ResearchGate. Трехступенчатый скрининг прошли 378 работ, в результате для итогового научного обзора было отобрано 42 источника (рис. 1).



Рис. 1. Структура научного обзора

Поиск научных источников проводился с помощью ключевых слов 3D-printing в сочетании с fibroids, fetus, prolapse, surgery, obstetrics, ovary, uterus, vagina. Были отобраны научные публикации за последние пять лет. Большинство источников – это научные статьи, опубликованные в высокорейтинговых журналах в области акушерства и гинекологии, медицины в целом, а также в передовых журналах по аддитивным технологиям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3D-печать анатомических моделей

Объекты, напечатанные на 3D-принтере, можно использовать для изучения сложных клинических случаев, при предоперационном планировании, обучении студентов и консультировании пациентов и их родственников.

С помощью 3D-печати возможно создание полноразмерных 3D-моделей репродуктивных органов — матки, маточных труб и яичников, в полной мере соответствующих реальным прототипам. Они могут с успехом применяться в обучении врачей, работающих в области вспомогательных репродуктивных технологий. На 3D-принтере возможна печать таких устройств, как катетер для переноса эмбриона, а также создание модели собственно эмбриона. 3D-печати в репродуктологии посвящена работа M.Z. Barbosa et al [22]. Авторы утверждают, что качественное предоперационное планирование с помощью 3D-моделей яичников, разработанных по магнитно-резонансным томограммам конкретной пациентки, способствует снижению количества осложнений, снижению травматизации во время процедуры получения ооцитов и сохранению овариального резерва.

В другом исследовании описаны две напечатанные 3D-модели мультифиброидной матки, созданные для планирования миомэктомии [23]. Первая модель была создана на основе магнитно-резонансной томографии (МРТ) снимков 42-летней пациентки, имеющей симптомы нарушения функции органов малого таза в связи со сдавлением их растущей миомой матки. Во втором случае была напечатана 3D-модель для планирования миомэктомии у 45-летней пациентки, которая в дальнейшем планировала деторождение и настаивала на органосохраняющей операции [23]. Просмотр цифровой 3D-модели и печатной модели повлиял на технику операции: были четко запланированы предполагаемый объем операции, методы гемостаза, время операции, оценен ожидаемый риск осложнений. Уверенность в намеченном хирургическом плане положительно повлияла на результат операции. Авторы подчеркивают, что 3D-модели органов, созданные на основе клинических данных конкретных пациентов, улучшают понимание сложной анатомии в гинекологической хирургии, повышают эффективность предоперационного планирования, шансы на положительный исход для пациентов [23].

С помощью 3D-печати можно повысить эффективность планирования оперативного родоразрешения [24]. A. Maskey et al. описывают трехмерную модель для печати, построенную из данных МРТ беременной матки с множественными миоматозными узлами [24]. Модель была распечатана для полной визуализации объекта и наиболее точного, оптимального планирования хирургического вмешательства в объеме кесарева сечения.

3D-печать может использоваться также для лучшей визуализации пороков развития плода.

3D-модели плода или его органов могут быть созданы на основе компьютерной томографии (КТ), магнитно-резонансной томографии (МРТ), а также ультразвукового исследования (УЗИ).

Особенно высока образовательная ценность моделей 3D-печати, выполненных с помощью микрофокусной компьютерной томографии (микро-КТ), которые позволяют визуализировать даже очень небольшие морфологические структуры. Данная методика, например, позволяет создавать модели сердца плода с 11-й недели внутриутробного развития, и, оценивая их в динамике, проследить формирование определенных пороков сердца [25]. D. Jarvis et al. описали опыт демонстрации нормального и аномального головного мозга плода [26]. По словам авторов, одной из главных их целей было улучшение понимания анатомии и обучение навыкам нейровизуализации [26]. Shelmerdine et al. сообщили о примере 3D-печати с помощью микро-КТ модели сердца плода на 16-й неделе беременности, демонстрирующей как основные сердечные сегменты (предсердия, желудочки и магистральные сосуды), так и более мелкие компоненты (сердечные клапаны, разветвление легочной артерии и аорты), сосочковые мышцы и трабекулы желудочков [27].

Виртуальные и печатные модели в настоящее время используются в дидактических и исследовательских целях. Эти модели потенциально могут представлять собой ценный ресурс для изучения анатомии репродуктивных органов женщины и строения внутриутробного плода студентами-медиками и врачами-стажерами, демонстрируя как нормальную анатомию, так и врожденные пороки развития различной сложности.

Появляются данные, свидетельствующие о том, что точные 3D-печатные копии могут улучшить процесс обучения, уменьшая потенциально негативные реакции со стороны студентов, которые могут возникнуть при наблюдении за реальными человеческими эмбрионами и плодами, а также дают возможность показать структуру эмбриона и плода на разных стадиях развития [25].

При обучении студентов медицинских вузов в России в настоящее время используются различные учебные пособия, изготовленные из гипса, резины и пластика. Данные предметы имеют достаточно высокую стоимость, при этом, учитывая активное их использование, в процессе эксплуатации возникают различные повреждения, требующие замены. 3D-печать может быть крайне полезна в данной ситуации. Для того чтобы проиллюстрировать перспективы 3D-печати для изготовления таких моделей, в рамках представленной работы была напечатана из PLA-пластика методом экструзионной печати (FDM) модель костного таза (рис. 2). Модель таза была изготовлена в натуральную величину из трех сегментов в течение 24 часов.

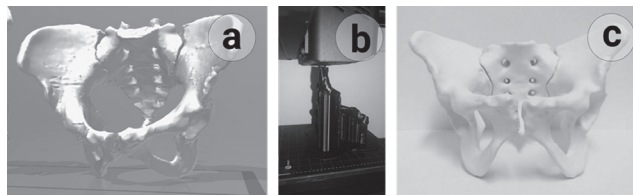


Рис. 2. Применение метода 3D-печати для изготовления медицинских моделей: а — CAD-модель, построенная на основе данных МРТ; б — процесс полимерной экструзионной 3D печати одного из трех сегментов; в — напечатанная и собранная модель

Использование 3D-печати при хирургических вмешательствах

При проведении гинекологических операций также могут быть использованы предметы, изготовленные с помощью 3D-печати. Инструменты, изготовленные с помощью трехмерной печати, могут быть полезны как в повседневной клинической практике, так и при проведении уникальных операций. Трехмерная печать позволяет модифицировать и индивидуально настраивать существующие предметы и инструменты, используемые в хирургии, а также создавать новые модели с нуля. Эта технология имеет большой потенциал для снижения экономических затрат при изготовлении новых инструментов и для генерации и распространения новых идей для создания хирургического инструментария [28, 30]. Преимущества 3D-печати по сравнению с традиционными методами производства включают отсутствие увеличения стоимости из-за повышенной сложности, ускорение проектирования до времени производства и модификации, специфичные для хирургов [28].

3D-печать можно использовать в том числе для изготовления вагинальных стентов и расширителей для детей и подростков по индивидуальным размерам на основе компьютерных моделей и использования компьютерной томографии при атрезии влагалища. 3D-печать представляет собой огромные перспективы исследований в области детской и подростковой гинекологии [31].

В работе J. Hakim et al. [32] представлены гинекологические устройства, созданные с помощью трехмерной печати, для оценки растяжимости тканей влагалища. После хирургического создания влагалищного канала большинству пациентов необходимо использовать вагинальный стент в послеоперационном периоде в течение некоторого периода времени, чтобы обеспечить репарацию тканей влагалища без соприкосновения друг с другом. Представлена методика объемной оценки полости влагалища и изготовления индивидуальных гинекологических устройств с помощью 3D-печати. Предполагается, что такой подход может способствовать увеличению потенциала заживления тканей с помощью гормонально-опосредованных и механотерапевтических подходов, которые можно настраивать в зависимости от возраста ткани, степени и направления растяжения [32].

Трехмерная печать лекарственных форм

С 2017-2018 гг. проводится разработка пероральных лекарственных форм с модифицированным высвобождением лекарств. Время высвобождения препарата регулируется толщиной стенки напечатанной капсулы и может составить от 12 до 198 минут. На сегодняшний день такие препараты не используются в клинической практике, продолжается исследование их безопасности *in vitro*, а также *in vivo* (на собаках) [33].

Очень интересной разработкой следует признать инновационные интравагинальные кольца с 3D-печатью: AnelleO PRO, первое интравагинальное кольцо, созданное с помощью трёхмерной печати и применяемое при лечении бесплодия [34]. Интравагинальные кольца (IVR — intravaginal rings) были разработаны и изготовлены таким образом, чтобы иметь сложную геометрическую форму для контроля дозированного высвобождения прогестерона. Первоначально были изготовлены кольца для высвобождения модельного лекарственного средства — β-эстрадиола. Далее процесс

был переведен на целевой препарат — прогестерон. В процессе создания данного устройства использовалось автоматизированное проектирование с указанием формы и геометрии, которые воссоздаются в процессе фотополимеризации. На изготовление одного кольца из биосовместимого полимера затрачивается примерно 15 минут. Оценка безопасности устройства проводилась на овцах. Это абсолютно новый подход к дизайну и изготовлению IVR-колец для лечения бесплодия, достоинством которого является персонализированный подход. Возможно изготовление «O»-, «M»- или «Y»-образных колец, а от формы кольца зависит доза и время выхода препарата [34, 35].

Трехмерная печать органов и тканей

Особенно интересной областью применения 3D печати является создание биопротезов органов и тканей [36-40]. В настоящее время существует острая нехватка донорских органов и тканей, и изготовление органов с использованием каркасов из биоматериалов и собственных клеток человека может стать потенциальным решением этой проблемы [40].

В статье K. Paul et al. [41] представлен первый отчет о биопринтинге мезенхимальных стволовых клеток, полученных из женского эндометрия (eMSC), которые потенциально могут применяться для лечения пролапса тазовых органов. Пролапсом тазовых органов различной степени тяжести в настоящее время страдают примерно 50% пожилых женщин и большинство из них не получает адекватного лечения. Сообщается о стратегии лечения, направленной на восстановление влагалищной стенки с использованием биопечати eMSC, инкапсулированных в гидрогель, и трехмерной электроспряденной сетки. Трехмерная сетка обеспечивает эффективную структурную поддержку, в то время как стволовые клетки эндометрия с биопечатью встраиваются в сетку, чтобы модулировать взаимодействие с клетками-хозяевами [41].

Инженерная разработка функциональных тканей и трехмерная печать могут использоваться для создания биопротезов яичников. Фолликулы яичников — это сферические многоклеточные агрегаты, включающие ооцит и окружающие его опорные клетки, гранулезу и тека-клетки. Сфероидная форма фолликула имеет решающее значение для его выживания и функционирования, поскольку поддерживающие клетки должны контактировать с ооцитом до тех пор, пока он не созреет и не будет готов к овуляции. Именно для поддержания этих межклеточных взаимодействий и формы фолликула может использоваться трехмерная материальная среда. В качестве первых шагов к этой цели были использованы извилистые трехмерные печатные пористые гидрогелевые каркасы с мышинными фолликулами, засеянными на всю глубину слоев каркаса, чтобы создать мышинный биопротез яичника. Было предположено, что эти каркасы будут обеспечивать трехмерную поддержку фолликулов и при этом позволять происходить васкуляризации и овуляции, для чего требуется определенная пористость структуры. В исследовании Laronda M.M. et al. на 3D-принтере были напечатаны микропористые гидрогелевые каркасы [42]. Исследовалось, как изменение геометрии пор, достигаемое за счет изменения угла продвижения между напечатанными слоями, влияет на выживание фолликулов яичников. В исследовании, проведенном на хирургически стерилизованных мышах, показано, что засеянные фолликулами

каркасы становятся сильно васкуляризованными, а функция яичников полностью восстанавливается [42]. Аналогичные результаты были получены и на собаках: после создания биопротеза яичника у собак породы бигль в результате естественного спаривания рождались щенки, которые в дальнейшем хорошо развивались в период лактации матери [42]. Подобные работы открывают огромные перспективы для пациенток, которые в результате лечения определённых заболеваний (например, онкологических) могут в дальнейшей столкнуться с развитием преждевременной недостаточности яичников и бесплодием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный литературный обзор позволяет сделать вывод, что 3D-печать в области акушерства и гинекологии — актуальное, набирающее обороты направление.

В настоящее время в России существует возможность создания анатомических моделей репродуктивных органов, костного таза, внутриутробного плода. Эта технология должна активно применяться для создания различных симуляторов и обучения студентов, ординаторов и врачей-курсантов. Организация лабораторий 3D-моделирования и печати может существенно повысить эффективность обучения студентов и ординаторов. Подоб-

ные навыки позволяют видеть проблему «в объёме», с учетом смежных систем, тканей и органов, искать персонализированные решения для каждого пациента, радикально снижая неблагоприятные последствия хирургического вмешательства.

Кроме этого, следует информировать акушеров-гинекологов и хирургов о возможности печати на 3D-принтере хирургических инструментов по индивидуальному дизайну, это может вдохновить их на воплощение собственных идей и развитие отечественных инновационных разработок. Трёхмерная печать лекарственных форм и биопротезов требуют более сложных технологических решений и в клинической практике в настоящее время еще не применяется. Однако, учитывая огромные перспективы данных направлений, следует предусмотреть различные гранты для их развития в России.

Источник финансирования

Поисково-аналитическая работа проведена на личные средства авторского коллектива.

Конфликт интересов

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

Выражение признательности

Авторы выражают признательность Институту физики металлов УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Powder-bed additive manufacturing for aerospace application: Techniques, metallic and metal/ceramic composite materials and trends / Katz-Demyanetz A., Popov V. V., Kovalevsky A. [et al.] // *Manuf. Rev.* – 2019. – Vol. 6. – Doi: 10.1051/mfreview/2019003.
2. Popov, V. V. Hybrid additive manufacturing of steels and alloys / V. V. Popov, A. Fleisher // *Manuf. Rev.* – 2020. – Vol. 7. – Doi: 10.1051/mfreview/2020005.
3. MakeShaper. Types of 3D Printing. – 2020. – Url: <https://makeshaper.com/types-3d-printing/>.
4. Selective laser sintering responses of keratin-based bio-polymer composites / S. Singamneni, R. Velu, M. P. Behera [et al.] // *Mater. Des.* – 2019. – Vol. 183. – Doi: 10.1016/j.matdes.2019.108087
5. Laser-based powder bed fusion of alumina toughened zirconia / F. Verga, M. Borlaf, L. Conti [et al.] // *Addit. Manuf.* – 2020. – Vol. 31. – Doi: 10.1016/j.addma.2019.100959.
6. Reaction bonding of silicon carbides by Binder Jet 3D-Printing, phenolic resin binder impregnation and capillary liquid silicon infiltration / A. Fleisher, D. Zolotaryov, A. Kovalevsky [et al.] // *Ceram. Int.* – 2019. – Vol. 45 (14). – P. 18023-18029. – Doi: 10.1016/j.ceramint.2019.06.021.
7. Ceramic binder jetting additive manufacturing: Particle coating for increasing powder sinterability and part strength / W. Du, X. Ren, C. Ma, Z. Pei // *Mater. Lett.* – 2019. – Vol. 234. – P. 327-330. – Doi: 10.1016/j.matlet.2018.09.118.
8. 3D printing of responsive hydrogels for drug-delivery systems / Larush L., Kaner I., Fluksman A. [et al.] // *J. 3D Print Med.* – 2017. – Vol. 1. – P. 219-229. – Doi: 10.2217/3dp-2017-0009.
9. Dababneh, A. B. Bioprinting Technology: A Current State-of-the-Art Review / A. B. Dababneh, I. T. Ozbolat // *J. Manuf. Sci. Eng.* – 2014. – Vol. 136. – P. 1-11. – Doi: 10.1115/1.4028512.
10. Bioprinted 3D Primary Human Intestinal Tissues Model Aspects of Native Physiology and ADME/Tox Functions / Madden L. R., Nguyen T. V., Garcia-Mojica S. [et al.] // *iScience.* – 2018. – Vol. 2. – P. 156-167. – Doi: 10.1016/j.isci.2018.03.015.
11. Design and 3D-printing of titanium bone implants: brief review of approach and clinical cases / Popov V. V., Muller-Kamskii G., Kovalevsky A. [et al.] // *Biomed. Eng. Lett.* – 2018. – Vol. 8 (4). – P. 337-344. – Doi: 10.1007/s13534-018-0080-5.
12. Patient-Specific Clavicle Reconstruction Using Digital Design and Additive Manufacturing / Cronskär M., Rännar L. E., Bäckström M. [et al.] // *J. Mech. Des. Trans. ASME.* – 2015. – Vol. 137 (11). P. 1-4. – Doi: 10.1115/1.4030992.
13. Additive Manufacturing Technology Applications Targeting Practical Surgery / A. Koptyug, L. E. Rännar, M. Backstorm, S. F. Franzen // *Int. J. Life Sci. Med. Res.* – 2013. – Vol. 3 (1). P. 15-24. – Doi: 10.1016/j.proeng.2013.07.037.
14. Custom-Made Titanium 3-Dimensional Printed Interbody Cages for Treatment of Osteoporotic Fracture-Related Spinal Deformity / Siu T. L., Rogers J. M., Lin K. [et al.] // *World Neurosurg.* – 2018. – Vol. 111. – P. 1-5. – Doi: 10.1016/j.wneu.2017.11.160.
15. Sarvankar, S. G. Additive Manufacturing in Automobile Industry / Sarvankar S. G., Yewale S. N. // *Int. J. Res. Aeronaut. Mech. Eng.* – 2019. – Vol. 7 (4). – P. 1-10.
16. Scott, C. BMW Impresses with 3D Printed Roof Bracket for BMW i8 Roadster. – 2018. – Url: <https://3dprint.com/222268/bmw-3d-printed-roof-bracket/>.
17. Ford tests large-scale 3D printing. – 2017. – Vol. 72 (3). – P. 208-209.
18. Aerospace applications of laser additive manufacturing / Liu R., Wang Z., Sparks T. [et al.] // Elsevier Ltd. – 2017. – P. 351-371. – Doi: 10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0.
19. Wohlers Associates. Wohlers Report 2020. – Url: <https://wohlersassociates.com/>.
20. Reconstruction of the temporomandibular joint: a comparison between prefabricated and customized alloplastic prosthetic total joint systems / B. J. Siegmund, K. Winter, P. Meyer-Marcotty, J. Rustemeyer // *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* – 2019. – Vol. 48 (8). – 1066-1071. – Doi: 10.1016/j.ijom.2019.02.002.
21. Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications / Malik H. H., Darwood A. R., Shaunak S. [et al.] // *J Surg Res.* – 2015. – Vol. 199 (2). – P. 512-522. – Doi: 10.1016/j.jss.2015.06.051.
22. Three-dimensionally-printed models in reproductive surgery: systematic review and clinical applications / M. Z. Barbosa, D. S. Zylbersztejn, L. A. de Mattos, L. F. Carvalho // *Minerva Ginecol.* – 2019. – Vol. 71 (3). – 235-244. – Doi: 10.23736/S0026-4784.19.04319-3.

23. 3D Printing in Gynecologic Surgery – an Innovative Tool for Surgical Planning / Cooke C., Flaxman T., Sheikh A. [et al.] // J. Minim. Invasive Gynecol. – 2019. – Vol. 26 (7). – P. S19-S20. – Doi: 10.1016/j.jmig.2019.09.508.
24. Three-Dimensional-Printed Uterine Model for Surgical Planning of a Cesarean Delivery Complicated by Multiple Myomas / Mackey A., Ng J.I., Core J. [et al.] // Obstet Gynecol. – 2019. – Vol. 133 (4). – P. 720-724. – Doi: 10.1097/AOG.0000000000003107.
25. Three dimensional printing of archived human fetal material for teaching purposes / Young J.C., Quayle M. R., Adams J. W. [et al.] // Anat Sci Educ. – 2019. – Vol. 1. – P. 90-96. – Doi: 10.1002/ase.1805.
26. Jarvis, D. Demonstration of normal and abnormal fetal brains using 3D printing from in utero MR imaging data / D. Jarvis, P. D. Griffiths, C. Majewski // AJNR Am J Neuroradiol. – 2016. – Vol. 37 (9). – P. 1757-1761. – Doi: 10.3174/ajnr.A4783.
27. 3D printing from microfocus computed tomography (micro-CT) in human specimens: education and future implications / Shelmerdine S. C., Simcock I. C., Hutchinson J. C. [et al.] // Br J Radiol. – 2018. – Vol. 91 (1088). – 20180306. – Doi: 10.1259/bjr.20180306.
28. 3D Printed Surgical Instruments: The Design and Fabrication Process / George M., Aroom K. R., Hawes H. G. [et al.] // World J Surg. – 2017. – Vol. 41 (1). – P. 314-319. – Doi: 10.1007/s00268-016-3814-5.
29. Stitely, M. L. Using Three-Dimensional Printing to Fabricate a Tubing Connector for Dilation and Evacuation / M. L. Stitely, H. Paterson // Obstet Gynecol. – 2016. – Vol. 127 (2). – P. 317-9. – Doi: 10.1097/AOG.0000000000001237.
30. Hoang D., Perrault D., Stevanovic M., Ghiassi A. Surgical applications of three-dimensional printing: a review of the current literature & how to get started / D. Hoang, D. Perrault, M. Stevanovic, A. Ghiassi // Ann Transl Med. – 2016. – Vol. 4 (23). – P. 456. – Doi:10.21037/atm.2016.12.18.
31. Innovative Use of 3D Printers in Pediatric and Adolescent Gynecology / J. Hakim, P. A. Smith, W. E. Cohn, J. E. Dietrich // Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology. – 2016. – Vol. 29 (2). – P. 205-206. – Doi:10.1016/j.jpag.2016.01.108.
32. Can We Improve Vaginal Tissue Healing Using Customized Devices: 3D Printing and Biomechanical Changes in Vaginal Tissue / Hakim J., Smith P. A., Singh M. [et al.] // Gynecologic and Obstetric Investigation. – 2019. – Vol. 84 (2). – P. 145-153. – Doi:10.1159/000491696.
33. 3D Printed Capsules for Quantitative Regional Absorption Studies in the GI Tract / Smith, D., Kapoor, Y., Hermans, A. [et al.] // International Journal of Pharmaceutics. – 2018. – Vol. 3 (s1). – P. 58. – Doi: 10.1016/j.ijpharm.
34. Januszewicz, R. 3466 Innovative 3D Printed Intravaginal Rings: Developing AnelleO PRO, the First Intravaginal Ring for Infertility / R. Januszewicz, Rahima J. S. Benhabbour // J. Clin. Transl. Sci. – 2019. – Vol. 3 (s1). – P. 58. – Doi: 10.1017/cts.2019.137.
35. Fu, J. 3D printing of vaginal rings with personalized shapes for controlled release of progesterone / J. Fu, X. Yu, Y. Jin // Int. J. Pharm. – 2018. – Vol. 539 (1-2). – P. 75-82. – Doi: 10.1016/j.ijpharm.2018.01.036.
36. Murphy S.V., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs / S. V. Murphy, A. Atala // Nat Biotechnol. – 2014. – Vol. 32 (8). – P. 773-85. – Doi: 10.1038/nbt.2958.
37. Jakus A.E., Rutz A. L., Shah R.N. Advancing the field of 3D biomaterial printing / A. E. Jakus, A. L. Rutz, R. N. Shah // Biomed Mater. – 2016. – Vol. 11 (1). – P. 014102. – Doi: 10.1088/1748-6041/11/1/014102.
38. 3D biofabrication strategies for tissue engineering and regenerative medicine / Bajaj P., Schweller R. M., Khademhosseini A. [et al.] // Annu Rev Biomed Eng. – 2014. – Vol. 16. – P. 247-276. – Doi: 10.1146/annurev-bioeng-071813-105155.
39. Three-dimensional bioprinting of thick vascularized tissues / D. B. Kolesky, K. A. Homan, M. A. Skylar-Scott, J. A. Lewis // Proc Natl Acad Sci USA. – 2016. – Vol. 113 (12). – P. 3179-84. – Doi: 10.1073/pnas.1521342113.
40. Lee, V. K. Printing of Three-Dimensional Tissue Analogs for Regenerative Medicine / V. K. Lee, G. Dai // Ann Biomed Eng. – 2017. – Vol. 45 (1). – P. 115-131. – Doi: 10.1007/s10439-016-1613-7.
41. 3D bioprinted endometrial stem cells on melt electrospun poly ϵ -caprolactone mesh for pelvic floor application promote anti-inflammatory responses in mice / Paul K., Darzi S., McPhee G. [et al.] // Acta Biomater. – 2019. – Vol. 97. – P. 162-176. – Doi: 10.1016/j.actbio.2019.08.003.
42. A bioprosthesis ovary created using 3D printed microporous scaffolds restores ovarian function in sterilized mice / Laronda M. M., Rutz A. L., Xiao S. [et al.] // Nat Commun. – 2017. – Vol. 8. – P. 15261. – Doi: 10.1038/ncomms15261.

Сведения об авторах

Кудрявцева Елена Владимировна, к.м.н., доцент
ФГБОУ ВО «УГМУ» Минздрава России,
г. Екатеринбург, Россия.
ORCID: 0000-0003-2797-1926
Email: elenavladpopova@yandex.ru

Ковалев Владислав Викторович, д.м.н., профессор
ФГБОУ ВО «УГМУ» Минздрава России,
г. Екатеринбург, Россия.
ORCID: 0000-0001-8640-8418
Email: vvkovalev55@gmail.com

Закуринова Екатерина Сергеевна
ФГБОУ ВО «УГМУ» Минздрава России,
г. Екатеринбург, Россия.
ORCID: 0000-0001-9452-008X
Email: zakurinovaekaterina@gmail.com

Камский Григорий Владимирович
Израильский институт металлов,
Технион, Хайфа, Израиль
ORCID: 0000-0001-9143-5736
Email: garym@technion.ac.il

Попов Владимир Владимирович, к.т.н.
Израильский институт металлов,
Технион, Хайфа, Израиль
ORCID: 0000-0003-4850-9212
Email: vvp@technion.ac.il

Information about the authors

Elena V. Kudryavtseva, PhD, associate professor
Ural State Medical University,
Ekaterinburg, Russia
ORCID: 0000-0003-2797-1926
Email: elenavladpopova@yandex.ru

Vladislav V. Kovalev, MD, PhD, Professor
Ural State Medical University,
Ekaterinburg, Russia
ORCID: 0000-0001-8640-8418
Email: vvkovalev55@gmail.com

Ekaterina S. Zakurinova
Ural State Medical University,
Ekaterinburg, Russia
ORCID: 0000-0001-9452-008X
Email: zakurinovaekaterina@gmail.com

Gary Muller-Kamskii, MSc
Israel Institute of metals,
Technion's R&D Foundation, Israel, Haifa
ORCID: 0000-0001-9143-5736
Email: garym@technion.ac.il

Vladimir V. Popov, PhD
Israel Institute of metals,
Technion's R&D Foundation, Israel, Haifa
ORCID: 0000-0003-4850-9212
Email: vvp@technion.ac.il