

6. Diamond J.R., Kreisberg R., Evans R., Nguyen T.A. Regulation of proximal tubular osteopontin in experimental hydronephrosis. *Kidney Int.* 1998;54(5):1501-9. (in Engl) doi: 10.1046/j.1523-1755.1998.00137.x.
7. Matveeva M.V., Samojlova YU.G., Kudlaj D.A. [et al.] Osteopontin as a factor of neuroinflammation in chronic non-infectious diseases. *Molecular medicine.* 2021;19(3):27-31. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.29296/24999490-2021-03-04>
8. Icer M.A., Gezmen-Karadag M. The multiple functions and mechanisms of osteopontin. *Clin. Biochem.* 2018;59:17-24. (in Engl) doi: 10.1016/j.clinbiochem.2018.07.003.
9. Castello L.M., Raineri D., Salmi L. [et al.] Osteopontin at the crossroads of inflammation and tumor progression. *Mediators Inflamm.* 2017;2017:4049098. (in Engl) doi: 10.1155/2017/4049098.
10. Shirakawa K., Sano M. Osteopontin in cardiovascular diseases. *Biomolecules.* 2021;11(7):1047. (in Engl)
11. Rogulska K., Wojciechowska-Koszko I., Dołęgowska B. [et al.] The most promising biomarkers of allogeneic kidney transplant rejection. *J. Immunol. Res.* 2022;2022:6572338. (in Engl) doi: 10.1155/2022/6572338.
12. Yang H.H., Hsu B.G., Ho C.C., Lee M.C. Association of serum osteopontin with first hospitalization and all-cause mortality after kidney transplantation. *Tzu Chi Med. J.* 2021;34(2):200-206. (in Engl) doi: 10.4103/tcmj.tcmj_269_20.
13. Xu C.X., Zhang Y.L., Huang X.Y. [et al.] Prediction of acute renal allograft rejection by combined HLA-G 14-bp insertion/deletion genotype analysis and detection of kidney injury molecule-1 and osteopontin in the peripheral blood. *Transpl. Immunol.* 2021;65:101371. (in Engl) doi: 10.1016/j.trim.2021.101371.
14. Moorman H.R., Poschel D., Klement J.D. [et al.] Osteopontin: a key regulator of tumor progression and immunomodulation. *Cancers (Basel).* 2020;12(11):3379. (in Engl) doi: 10.3390/cancers12113379.
15. Castello L.M., Baldrighi M., Molinari L. [et al.] The role of osteopontin as a diagnostic and prognostic biomarker in sepsis and septic shock. *Cells.* 2019;8(2):174. (in Engl) doi: 10.3390/cells8020174.
16. Kadota J., Mizunoe S., Mito K. [et al.] High plasma concentrations of osteopontin in patients with interstitial pneumonia. *Respir. Med.* 2005;99(1):111-7. (in Engl) doi: 10.1016/j.rmed.2004.04.018.17.
17. Komaru Y., Bai Y.Z., Kreisel D., Herrlich A. Interorgan communication networks in the kidney-lung axis. *Nat. Rev. Nephrol.* 2024;20(2):120-136. (in Engl) doi: 10.1038/s41581-023-00760-7.
18. Zhao H., Chen Q., Huang H. [et al.] Osteopontin mediates necroptosis in lung injury after transplantation of ischaemic renal allografts in rats. *Br. J. Anaesth.* 2019;123(4):519-530. (in Engl) doi: 10.1016/j.bja.2019.05.041.
19. Takahashi F., Takahashi K., Shimizu K. [et al.] Osteopontin is strongly expressed by alveolar macrophages in the lungs of acute respiratory distress syndrome. *Lung.* 2004;182(3):173-85. (in Engl) doi: 10.1007/s00408-004-0309-1.
20. Miyajima J., Hayashi T., Saito K. [et al.] The interaction between female sex hormone receptors and osteopontin in a rat hyperoxaluric model. *Kurume Med. J.* 2010;57(3):73-80. (in Engl) doi: 10.2739/kurumemedj.57.73.
21. Ito K., Nakajima A., Fukushima Y. [et al.] The potential role of osteopontin in the maintenance of commensal bacteria homeostasis in the intestine. *PLoS One.* 2017;12(3):e0173629. (in Engl) doi: 10.1371/journal.pone.0173629.
22. Groves A.M., Johnston C.J., Beutner G.G. [et al.] Neonatal hypoxic ischemic encephalopathy increases acute kidney injury urinary biomarkers in a rat model. *Physiol. Rep.* 2022;10(24):e15533. (in Engl) doi: 10.14814/phy2.15533.
23. Correa L.P., Marzano A.C.S., Silva Filha R. [et al.] Biomarkers of renal function in preterm neonates at 72h and 3weeks of life. *J. Pediatr. (Rio J).* 2021;97(5):508-513. (in Engl) doi: 10.1016/j.jpeds.2020.11.006.
24. Diao H., Liu X., Wu Z. [et al.] Osteopontin regulates interleukin-17 production in hepatitis. *Cytokine.* 2012;60(1):129-37. (in Engl) doi: 10.1016/j.cyto.2012.06.287.
25. Saitoh E., Matsui A., Inao M. [et al.] Extrahepatic manifestations in transgenic mice of osteopontin in hepatocytes-A clue to advent of pathological state in various organs of chronic hepatitis C patients. *Hepatol. Res.* 2005;31(4):197-202. (in Engl) doi: 10.1016/j.hepres.2005.01.010.
26. Morais J.F., Syn W.-K., Amâncio F.F. [et al.] Osteopontin Is Upregulated in Human and Murine Acute Schistosomiasis *Mansoni*. *PLoS Negl Trop Dis.* 2016;10(10): 50-57. (in Engl) doi: 10.1371/j.pntd.0005057.
27. Richert Q., Trajtmann A., Arroyave L. [et al.] Systemic inflammation before and after antiretroviral therapy initiation as a predictor of immune response among HIV-infected individuals in Manitoba. *Cytokine.* 2017;91:74-81. (in Engl) doi: 10.1016/j.cyto.2016.12.010.
28. Burdo T.H., Ellis R.J., Fox H.S. Osteopontin is increased in HIV-associated dementia. *J. Infect. Dis.* 2008;198(5):715-22. (in Engl) doi: 10.1086/590504.
29. Chagan-Yasutan H., Lacuesta T.L., Ndhlovu L.C. [et al.] Elevated levels of full-length and thrombin-cleaved osteopontin during acute dengue virus infection are associated with coagulation abnormalities. *Thromb. Res.* 2014;134(2):449-54. (in Engl) doi: 10.1016/j.thromres.2014.05.003.
30. Chagan-Yasutan H., Hanan F., Niki T. [et al.] Plasma osteopontin levels is associated with biochemical markers of kidney injury in patients with leptospirosis. *Diagnostics (Basel).* 2020;10(7):439. (in Engl) doi: 10.3390/diagnostics10070439.
31. Wang J., Li X., Wang Y. [et al.] Osteopontin aggravates acute lung injury in influenza virus infection by promoting macrophages necroptosis. *Cell Death Discov.* 2022;8(1):97. (in Engl) doi: 10.1038/s41420-022-00904-x.
32. Zhu Y., Wei Y., Chen J. [et al.] Osteopontin exacerbates pulmonary damage in influenza-induced lung injury. *Jpn J. Infect. Dis.* 2015;68(6):467-73. (in Engl) doi: 10.7883/yoken.JJID.2014.467.
33. Hayek S.S., Roderburg C., Blakely P. [et al.] Circulating osteopontin levels and outcomes in patients hospitalized for Covid-19. *J. Clin. Med.* 2021;10(17):3907. (in Engl) doi: 10.3390/jcm10173907.

УДК 681.625.9

© Коллектив авторов, 2024

А.И. Файрушина, Р.А. Заманова, Н.И. Абдуллина,
Д.З. Махьянов, Р.Ш. Иванова, С.В. Пятницкая
**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВИДОВ 3D-БИОПЕЧАТИ
И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ**
*Институт фундаментальной медицины ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
медицинский университет» Минздрава России, г. Уфа*

Дефицит тканей и органов является серьезной медицинской проблемой. Трехмерная биопечать представляет собой мультидисциплинарную технологию для проектирования трехмерных биологических тканей со сложной архитектурой и составом. Данная технология является многообещающей благодаря точному нанесению клеток пациента или донора в со-

стае гелей, которые выступают в качестве каркас-матриц, что позволяет создавать индивидуальные тканеинженерные конструкции для тканевой инженерии и регенеративной медицины. Весьма привлекательным для применения в клинической практике является появление технологии in-situ биопечати. Например, данная технология представляет собой прямую печать в месте дефекта, что значительно повышает возможности ее использования в регенеративной медицине.

Цель данного обзора – провести сравнительную характеристику основных и новых стратегий 3D-биопечати. Проведен анализ публикаций и исследований, находящихся в открытом доступе, отражающем основные результаты научных работ за последние 20 лет. По результатам проведенного анализа представлены основные типы биопечати, их достоинства и недостатки, возможности их применения для создания конструктов для тканевой инженерии и регенеративной медицины.

Ключевые слова: биопечать, биочернила, тканевая инженерия, регенеративная медицина, печать in-situ.

A.I. Fairushina, R.A. Zamanova, N.I. Abdullina,
D.Z. Makh'yanov, R.Sh. Ivanova, S.V. Piatnitskaia

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF 3D BIOPRINTING TYPES AND POSSIBILITIES OF THEIR APPLICATION IN CLINICAL PRACTICE

Tissue and organ deficiency is a serious medical problem. Three-dimensional bioprinting is actively developing at present and is a multidisciplinary technology for designing of three-dimensional biological tissues with complex architecture and composition. This technology is promising due to the precise application of patient or donor cells in gels that act as scaffold matrices, which allows creating individual tissue-engineered constructs for tissue engineering and regenerative medicine. The emergence of in-situ bioprinting technology is very attractive for use in clinical practice. For example, this technology is direct printing at the site of a defect, which significantly increases the possibilities of its use for regenerative medicine.

Aim of this review is to comparatively analyze the main types of 3D bioprinting strategies. The analysis of publications and research studies over the past 20 years in the public database has been performed. Results: the main types of bioprinting, their advantages and disadvantages, the possibilities of their application for the creation of tissue-engineered constructs for tissue engineering and regenerative medicine are presented.

Key words: bioprinting, bioink, tissue engineering, regenerative medicine, bioprinting in-situ.

Технология 3D-биопечати – это быстро развивающееся направление для создания биоэквивалентов органов и тканей для регенеративной медицины и тканевой инженерии. Биопечать представляет собой послойное нанесение биочернил, являющихся смесью живых клеток и гидрогелей на основе натуральных, синтетических полимеров или их сочетания для создания структур, точно имитирующих натуральные ткани и органы [1].

Родоначальницей биопечати можно считать 3D-печать. В 1983 году Чарльз Халл изобрёл стереолитографию для печати 3D-объектов на основе цифровых данных, что символизировало рождение 3D-печати. Биопечать была впервые продемонстрирована в 1988 году, когда Klebe R.J. использовал стандартный струйный принтер Hewlett-Packard для нанесения клеток с помощью технологии цитоскрайбирования [2]. В 1999 году Odde D.J. и Renn M.J. впервые использовали лазерную биопечать для нанесения живых клеток с целью разработки аналогов со сложной структурой [3]. В дальнейшем было представлено много новых продуктов, созданных при помощи технологии биопечати, таких как составной хрящ и искусственная печень, перфузируемое уменьшенное сердце.

Широко применяемыми методиками биопечати являются: экструзионный, струйный, лазерный и стереолитографический. В последнее время набирает популярность технология биопечати in situ, которая представляет собой печать живыми клетками непосредственно на месте дефекта, что может способствовать лучшему приживлению трансплантата [4].

Технология 3D-биопечати предъявляет жёсткие требования к выбору материалов. Подходящие полимеры должны обладать такими свойствами, как хорошая биосовместимость и биоразлагаемость, легкий механизм сшивания, надежные механические свойства и т.д. [5]. Ключевым моментом работы является сохранение высокой жизнеспособности клеток во время и после печати. Было обнаружено, что все эти четыре метода 3D-биопечати в разной степени отрицательно влияют на жизнеспособность клеток, что значительно ограничивает использование напечатанных конструкций [6]. Например, при биопечати на основе экструзии напряжение в основном возникает из-за напряжения сдвига, а величина общего напряжения сдвига определяется несколькими параметрами, включая размер сопла, давление, скорость печати и вязкостью биочернил [7].

Целью данного обзора является анализ основных типов биопечати с описанием достоинств и недостатков каждой технологии и возможности их применения для создания конструктов для тканевой инженерии и регенеративной медицины.

Классическая биопечать. Классическая биопечать охватывает ранние методы 3D-печати, используемые для создания живых тканей и органов. Появившаяся в начале 2000-х годов, эта технология подразумевает укладку клеток в биоматериалы для формирования трехмерных структур, повторяющих архитектуру тканей. Несмотря на то, что данные методы имели ограниченное разрешение и структурную сложность, они заложили основу для современных передовых методов биопе-

чати. Классический биопринтинг ознаменовал значительный прогресс в тканевой инженерии и регенеративной медицине. Хотя с тех пор появились новые технологии, основные принципы классического биопринтинга остаются центральными для достижений в этой быстро развивающейся области.

Струйная биопечать. Струйная биопечать представляет собой доступный, программируемый, бесконтактный метод, позволяющий печатать биочернила с высоким разрешением, сохраняя жизнеспособность клеток и обеспечивает быструю печать как двухмерных (2D), так и трёхмерных (3D) структур [8]. Изначально технология струйной печати была разработана для издательской индустрии, где она широко использовалась для создания текста и изображений [9]. Первые биопринтеры базировались на модифицированных 2D-принтерах, где картриджи с чернилами заменяли биоматериалами, а бумага была заменена подложками на электронно-управляемых лифтовых платформах [10]. Первое исследование, посвящённое биомедицинскому применению струйной печати, было проведено Klebe R.J. в 1988 году [2]. Wilson W.C. и Bolland T. в 2003 году одними из первых использовали модифицированный струйный биопринтер собственного изготовления для печати жизнеспособных клеток на двумерной подложке [11]. В настоящее время технология струйной печати была успешно интегрирована в область медицины и биомедицинской инженерии.

Существует две формы струйной биопечати: струйная печать по требованию (DOD) и непрерывная струйная печать (CIJ) [12]. Основное отличие их заключается в том, что в случае биопечати CIJ выбрасывается непрерывный поток жидкости, который имеет очень высокую скорость осаждения, но из-за переработки может произойти загрязнение [12], а метод DOD, выбрасывая капли только при необходимости, позволяет избежать перекрёстного загрязнения, что является предпочтительной технологией среди материаловедов и клеточных биологов [13]. Обе технологии позволяют создавать капли размером от 20 до 300 мкм, которые регулируются такими параметрами, как скорость осаждения капель и размер сопла, а также физическими свойствами биочернил [14]. При струйной биопечати обычно используются биочернила низкой вязкости, чтобы предотвратить засорение сопел, а заявленная скорость печати может достигать 200 мм/с [15].

Струйная биопечать успешно применяется для создания конструкций кожи [16], ко-

стей [17], хрящей [18], сердца [19] и демонстрирует потенциал для регенерации органов. Например, использование систем термоструйной пипетки (TIPS) позволяет целенаправленно доставлять клетки, в результате чего получают биоповязки, которые способствуют заживлению и восстановлению тканей [20]. Несмотря на эти достижения, остаются нерешёнными многие проблемы, такие как необходимость улучшения васкуляризации и выбора оптимальных источников клеток для конкретных целей [21].

Лазерная биопечать. Биопечать с помощью лазера (LAB) – это технология, основанная на LIFT (лазерно-индуцированном прямом переносе) [22], методе прямой лазерной записи, при котором печатаются узоры из биомолекул с высоким пространственным разрешением [23]. Эта технология была представлена более 30 лет назад Bohandy J. и др. [24]. В 2004 году Barron J.A. и соавт. разработали биологический лазерный принтер (BioLP) для переноса биологических узоров на подложки с пространственной точностью более 5 мкм [25]. При лазерной биопечати через адсорбирующий слой производится прямой высокоточный лазерно-индуцированный перенос одиночных клеток (тканевых сфероидов) на полимерную подложку любой вязкости [26] без использования сопла [27].

Максимальная заявленная скорость биопечати составляет ~20–500 мм/с [15]. Диапазон вязкости биочернил, с которыми может работать LAB, находится в диапазоне от 1 до 8000 мПа [28]. Биочернила, предназначенные для лазерной биопечати, должны обладать оптимальными характеристиками, такими как вязкость [29], плотность клеток и взаимодействие с принимающей подложкой (то есть поверхностное натяжение и смачиваемость) [30]. Несмотря на схожий со струйной печатью механизм LAB, как и другие методы на основе света, не требует использования сопла в процессе биопечати, что значительно снижает напряжение сдвига в клетках и повышает их жизнеспособность (>95%) [31]. Работа без сопел устраняет проблемы, связанные с засорением, даже при использовании биочернил с высокой вязкостью. Чтобы оценить влияние лазерной биопечати на клетки, Karakaidos P. и соавт. провели сравнительное исследование повреждений ДНК, сосредоточившись на субклеточном уровне. Они обнаружили, что LIFT безопасно печатает образцы клеток рака молочной железы с высокой жизнеспособностью и минимальным их повреждением [32].

LIFT успешно применяется для биопечати многоклеточных сфероидов, которые необходимы для тканевой инженерии благодаря улучшенному взаимодействию клеток [33]. Значительный прогресс был достигнут в биопечати трансплантируемых тканей для таких органов, как кожа [34], кровеносные сосуды [35], кости [36] и сердце [20], что подчеркивает универсальность LIFT при создании различных биологических структур [37].

Лазерная биопечать, как революционное достижение в области тканевой инженерии, позволяет печатать живые клетки с высоким разрешением, повышая их жизнеспособность и адаптивность в различных областях применения. Однако ее основными недостатками являются низкая точность формы, частая замена донорских слайдов, длительное время выполнения работ [38], а также дорогостоящие и невозможные для дозирования вязкоэластичные материалы [39].

Экструзионная биопечать. Экструзионная биопечать наиболее популярный тип печати благодаря своей коммерческой доступности, универсальности и способности создавать сложные и полые конструкции [40]. Процесс включает экструзию биочернил через сопло с послойным осаждением на подложку [41]. Основные методы экструзионной биопечати: пневматическая, использующая сжатый газ для подачи биочернил и механическая, использующая силу давящего поршня или шнека [42]. Последний метод обладает большей точностью и возможностью исправлять ошибки путем удаления избыточного материала благодаря отводу биочернил.

Экструзионная биопечать позволяет эффективно работать с широким спектром фото-, химически и термически сшиваемых гидрогелей, отличающихся различной вязкостью [43]. Этот метод позволяет создавать структуры с высокой концентрацией клеток и имитировать живые ткани. Однако механическое напряжение и повышенное давление во время печати могут негативно влиять на жизнеспособность клеток [44].

Применение экструзионной биопечати охватывает широкий спектр биомедицинских исследований и разработок, включая биопечать кожных покровов [45], кровеносных сосудов [46], костной ткани [47], хрящевой ткани [48], мышечной ткани [49], искусственных яичников [50], а также для моделирования опухолей [51]. Постоянное совершенствование биочернил и оборудования расширяет возможности экструзионной биопечати в создании функциональных и сложных биологических структур.

Новые направления биопечати. В современной классической 3D-биопечати имеется несколько недостатков: сложность точно и равномерно распределения компонентов биочернил в 3D-структуре, печатать клетки разных типов в заданных пропорциях, сохраняя при этом достаточную их жизнеспособность. Все это может серьезно ограничить пролиферативную активность клеток, их взаимодействие и функции.

В последние годы в регенеративной медицине и тканевой биологии набирают популярность такие методы, как акустическая (акустофлюидная) биопечать, магнитная биопечать и биопечать *in-situ*.

Акустическая биопечать. Это новейшая технология управления клеточным материалом при помощи звуковых волн [52], генерируемых «3D-акустическими пинцетами». Считается многообещающим методом неинвазивного и бесконтактного манипулирования благодаря отсутствию сопла и платформы [53]. С помощью специальных пинцетов возможна печать как отдельными клетками, так и клеточными агрегатами (сфероиды и органоидами), а также манипуляцией ими: захватывать, доставлять в нужные места, позволять им адгезировать и распространяться по поверхности или поверх ранее нанесённых клеток (послойная печать). При этом живые клетки ограждены от вредных стрессовых факторов, таких как нагревание, напряжение, давление и сила сдвига. Они присутствуют в классических подходах к биопечати [54].

На сегодняшний день метод активно применяется для имитации структуры тканей и органов различных систем: многослойной модели мозга [55], упорядоченных конструкций мышечной ткани [56], объемного синцития кардиомиоцитов [57], трубчатых уретральных трансплантатов [58], многослойной конструкции коленного мениска [59]. Акустическая биопечать также нашла применение как метод капельного введения опухолевых сфероидов и органоидов, чтобы воссоздать архитектуру первичной опухоли для моделирования инвазии и прогнозирования реакции на лечение [60].

Трёхмерные акустические пинцеты также могут стать вспомогательным инструментом, например при работе с конфокальными микроскопами обеспечивают точную транспортировку целевой клетки или небольшого участка ткани в фокусную область микроскопической линзы [61].

Магнитная биопечать. Это метод создания сложных тканевых структур, основан-

ный на работе внешних магнитных полей, интегрированных с процессами биопечати. Внутри этого метода существует два способа для объединения клеток в сформированные конструкции [62]. В первом случае клетки смешиваются с парамагнитным буфером, после чего подвергаются воздействию внешнего магнитного поля. В результате клетка ведет себя как диамагнитный материал, который мигрирует в область с меньшей напряженностью магнитного поля [63] для формирования клеточных агрегатов. Второй способ основан на противоположном механизме, при котором магнитные наночастицы намагничивают сами клетки, а не среду, после чего такими клетками можно управлять с помощью слабых магнитных сил. Ни наночастицы, ни магнитные поля не влияют на пролиферацию клеток, жизнеспособность, метаболизм, воспалительный и окислительный стрессы [64].

Метод магнитной биопечати используется в создании 3D-структур, имитирующих раковые образования [65], в оценке цитотоксичности [64], исследованиях по регенерации тканей и органов. Eugene E. [66] и соавт. сконструировали сложную структуру, такую как скелетная мышечная ткань на основе геля и мышечных миоцитов C2C12, которые достигли функциональной дифференцировки мио-трубки на 7-й день. Souza G.R. и соавт. [67] впервые предложили 3D-модель *in vitro* для оценки сократительной способности матки человека, сконструированную с помощью магнитной биопечати. Авторы обнаружили, что намагниченные клетки миометрия человека можно напечатать в виде колец и тем самым продемонстрировать разные паттерны сокращения и реакции на клинически значимые ингибиторы.

Магнитная биопечать также может быть применена для создания биосовместимых полимерных матриц с магнитным управлением. Данные системы могут применяться для регенерации тканей, а также для контролируемого высвобождения лекарственных препаратов. Подобную матрицу создала команда Kryuchkova A. [68], объединив шелк паутины, наночастицы Mn-Zn ферритов и липосомы для комплексной регенерации хряща.

Биопечать *in-situ*. Это актуальный альтернативный метод, заключающийся в прямом автоматическом нанесении биочернил, клеток и биоактивных факторов в место повреждения. Эта идея, предложенная Campbell P.G. и Weiss L.E. в 2007 году [69] обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной биопечатью *ex situ*: оптимизирует хирургические вмешательства, ускоряет время

восстановления повреждений, адаптирует лечение под индивидуальные потребности пациента. Однако для полного раскрытия потенциала этого типа печати необходимо выполнить два основных требования: во-первых, требуется точное сканирование каждого дефекта, которые часто обладают неправильной геометрией; во-вторых, автоматизированная система биопечати должна обеспечивать необходимое свободное рабочее пространство для печати внутри дефектов [70].

Выделяют два основных подхода к биопечати *in situ* – роботизированными манипуляторами и ручными устройствами [71]. Изначально под биопечать *in situ* были адаптированы классические варианты биопринтирования, но не так давно был представлен ферромагнитный робот-катетер, примененный *in situ* для минимально инвазивного восстановления печени на животной модели [72].

Биочернила как важнейший компонент основы, поддерживающий жизнеспособность клеток и развитие тканей, играют ключевую роль в успехе биопечати *in situ*. На сегодняшний день применяют разные варианты биочернил, например фибриновые [16,69] на основе гиалуроновой кислоты [73] и модифицированные метакрилатом [74], альгинатом [75], желатин-метакрилоилом [76]. Некоторые исследователи рекомендуют добавлять биоактивные вещества, такие как, например, факторы роста [77], наночастицы металлов и проводящие полимеры [78], что может иметь решающее значение, например, в процессах регенерации нервов и сердечной ткани. Однако подбор и адаптация биочернил под печать *in situ* все еще является широким полем для исследований.

Биопечать *in situ* в первую очередь зарекомендовала себя при лечении глубоких и поверхностных кожных ран [16,73]. Однако круг исследований расширяется и на другие системы органов. В своем исследовании Russell C.S. и соавт. [79] сообщают о применении портативного биопринтера *in situ* для лечения повреждений скелетных мышц. Напечатанные скаффолды адгезировали и интегрировались в окружающие ткани, обеспечили пролиферацию клеток и формирование многоядерных миотрубок в течение 28 дней после имплантации без признаков сильного воспаления.

Приведено успешное применение процесса биопечати *in situ* для восстановления костной ткани в модели, имитирующей травму черепа [80]. Роботизированный принтер смог правильно восстановить дефект черепа площадью 40 см² за короткое время. Данный способ биопечати существенно сокращает

продолжительность рабочего процесса по восстановлению костных травм в сравнении с традиционной хирургической операцией.

Ugicuo A. и соавт. предложили концепцию интравитального 3D-биопринтинга (i3D-биопринтинг), в основе которого лежит изготовление пространственно-контролируемых 3D-конструкций внутри тканей. Биосовместимость данного метода была доказана авторами на мышах путем печати светочувствительными гидрогелями внутри дермы, скелетных мышц и мозга [81].

Подводя итог, можно сказать, что описанные разработки способны развить область биопечати, что позволит создавать более функциональные ткани, органоиды или модели заболеваний. Необходимо изучить потенциал данных технологий для объединения нескольких типов клеток и биоматериалов для печати трёхмерных биологических структур.

Заключение

Биопечать имеет огромный потенциал применения во многих научных областях и

биоинженерии. Данная технология предполагает создание для пациентов индивидуальных конструкций с возможностью проектирования сложных и гетерогенных структур тканей. Оптимальное поддержание жизнеспособности клеток в составе биочернил и последующая печать в точной архитектуре конструкта требуют четкого понимания методов печати и тщательного контроля качества напечатанной конструкции. Дальнейшее совершенствование технологий биопечати способствует устранению текущих ограничений, открывает широкие возможности в регенеративной медицине с последующим применением результатов в клинической практике.

Информация о финансировании: работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Башкирского государственного медицинского университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

Сведения об авторах статьи:

Файрушина Аделия Ильдаровна – м.н.с. лаборатории биопринтинга Института фундаментальной медицины ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450008, г. Уфа, ул. Ленина, 3. E-mail: adelia_ildarionova@mail.ru.

Заманова Розалия Артуровна – м.н.с. лаборатории биопринтинга Института фундаментальной медицины ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450008, г. Уфа, ул. Ленина, 3. E-mail: razamanova@bashgmu.ru.

Абдуллина Нурия Ильдаровна – лаборант лаборатории биопринтинга Института фундаментальной медицины ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450008, г. Уфа, ул. Ленина, 3. E-mail: abdullinanuri@gmail.com.

Махьянов Динар Забирович – лаборант-исследователь лаборатории биопринтинга Института фундаментальной медицины ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450008, г. Уфа, ул. Ленина, 3. E-mail: makhyanovdinar@mail.ru.

Иванова Расима Шамиловна – магистрант первого года обучения по направлению Биология Минздрава России. Адрес: 450008, г. Уфа, ул. Ленина, 3. E-mail: Simaufa@mail.ru.

Пятницкая Светлана Викторовна – заведующий лабораторией биопринтинга Института фундаментальной медицины ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450008, г. Уфа, ул. Ленина, 3. E-mail: svpyatnickaya@bashgmu.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. Three-Dimensional Bioprinting: A Comprehensive Review for Applications in Tissue Engineering and Regenerative Medicine / N. A. Mirsky [et al.] // Bioengineering (Basel). – 2024. – Vol. 11. – No. 8. – P. 777. – DOI: 10.3390/bioengineering11080777.
2. Klebe, R. J. Cytoscribing: a method for micropositioning cells and the construction of two- and three-dimensional synthetic tissues / R. J. Klebe // Exp. Cell Res. – 1988. – Vol. 179. – No. 2. – P. 362–373. – DOI: 10.1016/0014-4827(88)90275-3.
3. Odde, D. J. Laser-guided direct writing for applications in biotechnology / Odde D. J., Renn M. J. // Trends Biotechnol. – 1999. – Vol. 17. – No. 10. – P. 385–389. – DOI: 10.1016/s0167-7799(99)01355-4.
4. Bioinks adapted for in situ bioprinting scenarios of defect sites: a review / Li R. [et al.] // RSC Adv. – 2023. – Vol. 13. – No. 11. – P. 7153–7167.
5. A review on cell damage, viability, and functionality during 3D bioprinting / Xu H. Q. [et al.] // Mil. Med. Res. – 2022. – Vol. 9. – No. 1. – P. 70.
6. An Introduction to 3D Bioprinting: Possibilities, Challenges and Future Aspects / Kačarević Ž. P. [et al.] // Materials (Basel). – 2018. – Vol. 11. – No. 11. – P. 2199. – DOI: 10.3390/ma11112199.
7. Godar, D. E. 3D Bioprinting with UVA1 Radiation and Photoinitiator Irgacure 2959: Can the ASTM Standard L929 Cells Predict Human Stem Cell Cytotoxicity? / Godar D. E., Gurunathan C., Ilev I. // Photochem. Photobiol. – 2019. – Vol. 95. – No. 2. – P. 581–586.
8. Nakamura, M. 3D micro-fabrication by inkjet 3D biofabrication for 3D tissue engineering / Nakamura M., Nishiyama Y., Henmi C. // In: 2008 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science; 2008; Nagoya, Japan. Piscataway (NJ): IEEE; 2008. – P. 451–456.
9. Inkjet Bioprinting of Biomaterials / Li X. [et al.] // Chem. Rev. – 2020. – Vol. 120. – No. 19. – P. 10793–10833.
10. 3D bioprinting of microorganisms: principles and applications / Herzog J. [et al.] // Bioprocess Biosyst Eng. – 2024. – Vol. 47. – No. 4. – P. 443–461.
11. Wilson, W. C. Jr. Cell and organ printing 1: protein and cell printers / Wilson W. C. Jr, Boland T. // Anat. Rec. A Discov. Mol. Cell Evol. Biol. – 2003. – Vol. 272. – No. 2. – P. 491–496. – DOI: 10.1002/ar.a.10057.
12. Scaffolds for tissue engineering produced by inkjet printing / Zhang Y. [et al.] // Open Eng. – 2012. – Vol. 2. – No. 3. – P. 325–335. –
13. Effective bioprinting resolution in tissue model fabrication / Miri A. K. [et al.] // Lab Chip. – 2019. – Vol. 19. – No. 11. – P. 2019–2037.
14. Inkjet and inkjet-based 3D printing: connecting fluid properties and printing performance / Guo Y. [et al.] // Rapid Prototyping J. – 2017. – Vol. 23. – No. 3. – P. 562–576. – DOI: 10.1108/RPJ-05-2016-0076.
15. Tetsuka, H. Materials and technical innovations in 3D printing in biomedical applications / Tetsuka H., Shin S.R. // J. Mater. Chem. B. – 2020. – Vol. 8. – No. 11. – P. 2311–2334. – DOI: 10.1039/c9tb02871k.
16. In situ bioprinting of autologous skin cells accelerates wound healing of extensive excisional full-thickness wounds / Albanna M. [et al.] // Sci Rep. – 2019. – T. 9. – № 1. – C. 1856. – doi: 10.1038/s41598-018-38366-w.
17. 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration / Inzana J. A. [et al.] // Biomaterials. – 2014. – T. 35. – № 13. – C. 4026–4034. – doi: 10.1016/j.biomaterials.2014.01.064.
18. Direct human cartilage repair using three-dimensional bioprinting technology / Cui X. [et al.] // Tissue Eng. Part A. – 2012. – Vol. 18. – No. 11–12. – P. 1304–1312. – DOI: 10.1089/ten.TEA.2011.0543.

19. Fabrication and characterization of bio-engineered cardiac pseudo tissues / Xu T. [et al.] // *Biofabrication*. – 2009. – Т. 1. – № 3. – С. 035001. – doi: 10.1088/1758-5082/1/3/035001.
20. Application of a 3D bioprinter: jet technology for 'biopatch' development using cells on hydrogel supports / DeMel D. C. [et al.] // *Bio-techniques*. – 2024. – Т. 76. – № 2. – С. 52-62. – doi: 10.2144/btn-2023-0052.
21. Advancements of 3D bioprinting in regenerative medicine: Exploring cell sources for organ fabrication / Ma Y. [et al.] // *Heliyon*. – 2024. – Т. 10, № 3. – e24593. – doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24593.
22. Bioinks and biofabrication techniques for biosensors development: A review / Byrne R. [et al.] // *Mater Today Bio*. – 2024. – Т. 28. – 101185. – doi: 10.1016/j.mtbio.2024.101185.
23. DNA deposition through laser induced forward transfer / Colina M. [et al.] // *Biosens Bioelectron*. – 2005. – Т. 20. – № 8. – С. 1638-1642. – doi: 10.1016/j.bios.2004.08.047.
24. Bohandy, J. Metal deposition from a supported metal film using an excimer laser / Bohandy J., Kim B. F., Adrian F. J. // *J Appl Phys*. – 1986. – Т. 60. – № 4. – С. 1538-1539. – <https://doi.org/10.1063/1.337287>.
25. Biological laser printing: a novel technique for creating heterogeneous 3-dimensional cell patterns / Barron J. A. [et al.] // *Biomed Microdevices*. – 2004. – Vol. 6. – No. 2. – P. 139-147. <https://doi.org/10.1023/b:bmm.0000031751.67267.9f>.
26. Application of laser printing to mammalian cells / Barron J. A. [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2004. – Vol. 453. – P. 383-387. <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2003.11.161>.
27. Bioprinting by laser-induced forward transfer for tissue engineering applications: jet formation modeling / Mézel C. [et al.] // *Biofabrication*. – 2010. – Vol. 2. – No. 1. – P. 014103. <https://doi.org/10.1088/1758-5082/2/1/014103>.
28. Freeform drop-on-demand laser printing of 3D alginate and cellular constructs / Xiong R. [et al.] // *Biofabrication*. – 2015. – Vol. 7. – No. 4. – P. 045011. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/7/4/045011>.
29. Recent Advances in Bioprinting Techniques: Approaches, Applications and Future Prospects / Li J. [et al.] // *J Transl Med*. – 2016. – Vol. 14. – P. 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12967-016-1028-0>.
30. Bioinks for 3D Bioprinting: A Scientometric Analysis of Two Decades of Progress / Pedroza-González S. C. [et al.] // *Int J Bioprint*. – 2021. – Vol. 7. – No. 2. – P. 333. <https://doi.org/10.18063/ijb.v7i2.337>.
31. Study of gelatin as an effective energy absorbing layer for laser bioprinting / Xiong R. [et al.] // *Biofabrication*. – 2017. – Vol. 9. – No. 2. – P. 024103. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aa74f2>.
32. Laser Bioprinting of Cells Using UV and Visible Wavelengths: A Comparative DNA Damage Study / Karakaidos P. [et al.] // *Bioengineering (Basel)*. – 2022. – Vol. 9. – No. 8. – P. 378. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9080378>.
33. Laser-assisted bioprinting of targeted cartilaginous spheroids for high density bottom-up tissue engineering / Hall GN. [et al.] // *Biofabrication*. – 2024. – Т. 16. – № 4. – С. 045011. – DOI: 10.1088/1758-5090/ad6e1a.
34. Tissue engineered skin substitutes created by laser-assisted bioprinting form skin-like structures in the dorsal skin fold chamber in mice / Michael S. [et al.] // *PLoS One*. – 2013. – Т. 8. – № 3. – С. e57741. – DOI: 10.1371/journal.pone.0057741.
35. Freeform drop-on-demand laser printing of 3D alginate and cellular constructs / Xiong R. [et al.] // *Biofabrication*. – 2015. – Т. 7. – № 4. – С. 045011. – DOI: 10.1088/1758-5090/7/4/045011.
36. Laser-assisted bioprinting for creating on-demand patterns of human osteoprogenitor cells and nano-hydroxyapatite / Catros S. [et al.] // *Biofabrication*. – 2011. – Т. 3. – № 2. – С. 025001. – DOI: 10.1088/1758-5082/3/2/025001.
37. Chang, J. Laser-induced forward transfer based laser bioprinting in biomedical applications / Chang J, Sun X. // *Front Bioeng Biotechnol*. – 2023. – Т. 11. – С. 1255782. – DOI: 10.3389/fbioe.2023.1255782.
38. Zennifer, A. Design considerations of bioinks for laser bioprinting technique towards tissue regenerative applications / Zennifer A, Subramanian A, Sethuraman S. // *Bioprinting*. – 2022. – Т. 27. – С. e00205. – DOI: 10.1016/j.bprint.2022.e00205.
39. Budharaju, H. Embedded 3D bioprinting: An emerging strategy to fabricate biomimetic & large vascularized tissue constructs / Budharaju H., Sundaramurthi D., Sethuraman S. // *Bioact. Mater.* – 2023. – Т. 32. – С. 356-384. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2023.10.012>.
40. Advances in extrusion 3D bioprinting: A focus on multicomponent hydrogel-based bioinks / Cui X. [et al.] // *Adv. Healthc. Mater.* – 2020. – Т. 9. – № 15. – С. e1901648. <https://doi.org/10.1002/adhm.201901648>.
41. 3D extrusion bioprinting / Zhang Y.S. [et al.] // *Nat. Rev. Methods Primers*. – 2021. – Т. 1. – С. 75. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00073-8>.
42. Emerging technologies in multi-material bioprinting / Ravanbakhsh H. [et al.] // *Adv. Mater.* – 2021. – Т. 33. – № 49. – С. e2104730. <https://doi.org/10.1002/adma.202104730>.
43. 3D bioprinting for engineering complex tissues / Mandrycky C. [et al.] // *Biotechnol. Adv.* – 2016. – Т. 34. – № 4. – С. 422-434. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.011>.
44. 3D bioprinting and its innovative approach for biomedical applications / Tripathi S. [et al.] // *MedComm*. – 2022. – Т. 4. – № 1. <https://doi.org/10.1002/mco2.194>.
45. Perez-Valle A. Overview of Current Advances in Extrusion Bioprinting for Skin Applications / Perez-Valle A, Del Amo C, Andia I. // *Int J Mol Sci*. – 2020 – Т. 21 – №18 – С. 6679. doi: 10.3390/ijms21186679
46. In vitro evaluation of carbon-nanotube-reinforced bioprintable vascular conduits / F. Dolati [et al.] // *Nanotechnology*. – 2014. – Vol. 25, № 14.
47. Nedreelow, D.S. Osteochondral Regeneration With Anatomical Scaffold 3D-Printing-Design Considerations for Interface Integration / D.S. Nedreelow, J.M. Townsend, M.S. Detamore // *J Biomed Mater Res A*. – 2024. – P. 1-17.
48. You, F. Application of Extrusion-Based Hydrogel Bioprinting for Cartilage Tissue Engineering / F. You, B.F. Eames, X. Chen // *Int J Mol Sci*. – 2017. – Vol.18, №7.
49. A novel extrusion-based 3D bioprinting system for skeletal muscle tissue engineering / E. Fornetti [et al.] // *Biofabrication*. – 2023. – Vol. 15, № 2.
50. Three-dimensional bioprinting of artificial ovaries by an extrusion-based method using gelatin-methacryloyl bioink / T. Wu [et al.] // *Climacteric*. – 2022. – Vol. 25, № 2. – P.170-178.
51. Extrusion bioprinting of hydroxyethylcellulose-based bioink for cervical tumor model / A. Gospodinova [et al.] // *Carbohydr Polym.* – 2021. – Vol. 260.
52. Acoustofluidics for cell patterning and tissue engineering / Wu Z. [et al.] // *Eng. Regen*. – 2022. – Т. 3, № 4. – С. 397-406. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2022.08.005>.
53. Capillary wave tweezer / Orme B. [et al.] // *Sci. Rep.* – 2024. – Т. 14. – № 1. – С. 12448. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63154-0>.
54. Mierke, C.T. Bioprinting of cells, organoids, and organs-on-a-chip together with hydrogels improves structural and mechanical cues / Mierke C.T. // *Cells*. – 2024. – Т. 13, № 19. – С. 1638. <https://doi.org/10.3390/cells13191638>.
55. A bio-acoustic levitational (BAL) assembly method for engineering of multilayered, 3D brain-like constructs, using human embryonic stem cell derived neuro-progenitors / Bouyer C. [et al.] // *Adv. Mater.* – 2016. – Т. 28. – № 1. – С. 161-167. <https://doi.org/10.1002/adma.201503916>.
56. Engineering anisotropic muscle tissue using acoustic cell patterning / Armstrong J.P.K. [et al.] // *Adv. Mater.* – 2018. – Т. 30. – № 43. – С. e1802649. <https://doi.org/10.1002/adma.201802649>.
57. Bioacoustic-enabled patterning of human iPSC-derived cardiomyocytes into 3D cardiac tissue / Serpooshan V. [et al.] // *Biomaterials*. – 2017. – Т. 131. – С. 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2017.03.037>.

58. Biofabrication of a functional tubular construct from tissue spheroids using magnetoacoustic levitational directed assembly / Parfenov V.A. [et al.] // *Adv. Healthc. Mater.* – 2020. – Т. 9. – № 24. – С. e2000721. <https://doi.org/10.1002/adhm.202000721>.
59. Incorporation of conductive materials into hydrogels for tissue engineering applications / Chansoria P. [et al.] // *Polymers (Basel)*. – 2018. – Т. 10. – № 10. – С. 1078. <https://doi.org/10.3390/polym10101078>.
60. Acoustic bioprinting of patient-derived organoids for predicting cancer therapy responses/ Chen H. [et al.] // *Adv. Healthc. Mater.* – 2022. – Т. 11. – № 13. – С. e2102784. <https://doi.org/10.1002/adhm.202102784>.
61. Three-dimensional manipulation of single cells using surface acoustic waves / Guo F. [et al.] // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* – 2016. – Т. 113. – No 6. – С. 1522-1527. <https://doi.org/10.1073/pnas.1524813113>.
62. Progress in bioprinting technology for tissue regeneration / Sabzevari A. [et al.] // *J. Artif. Organs*. – 2023. – Т. 26. – № 4. – С. 255-274.
63. In situ 3D label-free contactless bioprinting of cells through diamagnetophoresis / Abdel Fattah A. R. [et al.] // *ACS Biomater. Sci. Eng.* – 2016. – Dec 12. – Vol. 2. – № 12. – P. 2133-2138. <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.6b00614>.
64. A spheroid toxicity assay using magnetic 3D bioprinting and real-time mobile device-based imaging / Tseng H. [et al.] // *Sci. Rep.* – 2015. – Sep 14. – Vol. 5. – P. 13987. <https://doi.org/10.1038/srep13987>.
65. 3D cellular structures and co-cultures formed through the contactless magnetic manipulation of cells on adherent surfaces / Abdel Fattah A. R. [et al.] // *Biomater. Sci.* – 2018. – Feb 27. – Vol. 6. – № 3. – P. 683-694. <https://doi.org/10.1039/c7bm01050h>.
66. Magnetically actuated GelMA-based scaffolds as a strategy to generate complex bioprinted tissues / Ergene E. [et al.] // *Adv. Mater. Technol.* – 2024. – Vol. 9. – P. 2400119. <https://doi.org/10.1002/admt.202400119>.
67. Magnetically bioprinted human myometrial 3D cell rings as a model for uterine contractility / Souza G. R. [et al.] // *Int. J. Mol. Sci.* – 2017. – Mar 23. – Vol. 18. – № 4. – P. 683. <https://doi.org/10.3390/ijms18040683>.
68. Magnetothermal spider silk-based scaffolds for cartilage regeneration / Kryuchkova A. [et al.] // *Int. J. Biol. Macromol.* – 2023. – Dec 31. – Vol. 253 (Pt 6). – P. 127246. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127246>.
69. Campbell, P. G. Tissue engineering with the aid of inkjet printers / Campbell P. G., Weiss L. E. // *Expert Opin. Biol. Ther.* – 2007. – Aug. – Vol. 7. – № 8. – P. 1123-1127. <https://doi.org/10.1517/14712598.7.8.1123>.
70. In situ bioprinting: intraoperative implementation of regenerative medicine / Samandari M. [et al.] // *Trends Biotechnol.* – 2022. – Oct. – Vol. 40. – № 10. – P. 1229-1247. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.03.009>.
71. In situ bioprinting – Bioprinting from benchside to bedside? / Singh S. [et al.] // *Acta Biomater.* – 2020. – Jan 1. – Vol. 101. – P. 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.08.045>.
72. Minimally invasive bioprinting for in situ liver regeneration / Yang Y. [et al.] // *Bioact. Mater.* – 2023. – Mar 29. – Vol. 26. – P. 465-477. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2023.03.011>.
73. Handheld instrument for wound-conformal delivery of skin precursor sheets improves healing in full-thickness burns / Cheng R. Y. [et al.] // *Biofabrication*. – 2020. – Feb 3. – Vol. 12. – № 2. – P. 025002. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/ab6413>.
74. Application of robotic-assisted in situ 3D printing in cartilage regeneration with HAMA hydrogel: An in vivo study / Ma K. [et al.] // *J. Adv. Res.* – 2020. – Jan 28. – Vol. 23. – P. 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.01.010>.
75. 4D printing of a sodium alginate hydrogel with step-wise shape deformation based on variation of crosslinking density / Cao P. [et al.] // *ACS Appl. Polym. Mater.* – 2021. – Nov 5. – Vol. 3. – № 12. – P. 6167-6175. <https://doi.org/10.1021/acsapm.1c01034>.
76. In situ 3D bioprinting with bioconcrete bioink / Xie M. [et al.] // *Nat. Commun.* – 2022. – Jun 23. – Vol. 13. – № 1. – P. 3597. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30997-y>.
77. In vivo printing of nanoenabled scaffolds for the treatment of skeletal muscle injuries / Quint J. P. [et al.] // *Adv. Healthc. Mater.* – 2021. – Т. 10. – № 10. – С. e2002152. doi: 10.1002/adhm.202002152.
78. Min, J. H. Incorporation of conductive materials into hydrogels for tissue engineering applications / Min J. H., Patel M., Koh W. G. // *Polymers (Basel)*. – 2018. – Т. 10. – № 10. – С. 1078. doi: 10.3390/polym10101078.
79. In situ printing of adhesive hydrogel scaffolds for the treatment of skeletal muscle injuries / Russell C. S. [et al.] // *ACS Appl. Bio Mater.* – 2020. – Т. 3. – № 3. – С. 1568-1579. doi: 10.1021/acsabm.9b01176.
80. Analysis of the robotic-based in situ bioprinting workflow for the regeneration of damaged tissues through a case study / Fortunato G. M. [et al.] // *Bioengineering*. – 2023. – Т. 10. – № 5. – С. 560. doi: 10.3390/bioengineering10050560.
81. Intravital three-dimensional bioprinting / Urciuolo A. [et al.] // *Nat. Biomed. Eng.* – 2020. – Т. 4. – № 9. – С. 901-915.

REFERENCES

1. Mirsky NA, Ehlen QT, Greenfield JA, Antonietti M, Slavin BV, Nayak VV, Pelaez D, Tse DT, Witek L, Daunert S, Coelho PG. Three-Dimensional Bioprinting: A Comprehensive Review for Applications in Tissue Engineering and Regenerative Medicine. *Bioengineering (Basel)*. 2024 Jul 31;11(8):777. doi: 10.3390/bioengineering11080777. (in Engl)
2. Klebe RJ. Cytoscribing: a method for micropositioning cells and the construction of two- and three-dimensional synthetic tissues. *Exp Cell Res*. 1988 Dec;179(2):362-73. doi: 10.1016/0014-4827(88)90275-3. (in Engl).
3. Odde DJ, Renn MJ. Laser-guided direct writing for applications in biotechnology. *Trends Biotechnol*. 1999 Oct;17(10):385-9. doi: 10.1016/s0167-7799(99)01355-4. (in Engl)
4. Li R, Zhao Y, Zheng Z, Liu Y, Song S, Song L, Ren J, Dong J, Wang P. Bioinks adapted for in situ bioprinting scenarios of defect sites: a review. *RSC Adv*. 2023 Mar 3;13(11):7153-7167. (in Engl)
5. Xu HQ, Liu JC, Zhang ZY, Xu CX. A review on cell damage, viability, and functionality during 3D bioprinting. *Mil Med Res*. 2022 Dec 16;9(1):70. doi: 10.1186/s40779-022-00429-5. (in Engl)
6. Kačarević ŽP, Rider PM, Alkildani S, Retnasingh S, Smeets R, Jung O, Ivanišević Z, Barbeck M. An Introduction to 3D Bioprinting: Possibilities, Challenges and Future Aspects. *Materials (Basel)*. 2018 Nov 6;11(11):2199. doi: 10.3390/ma11112199. (in Engl)
7. Godar DE, Gurunathan C, Ilev I. 3D Bioprinting with UVA1 Radiation and Photoinitiator Irgacure 2959: Can the ASTM Standard L929 Cells Predict Human Stem Cell Cytotoxicity? *Photochem Photobiol*. 2019 Mar;95(2):581-586. (in Engl)
8. Nakamura M, Nishiyama Y, Henmi C. 3D micro-fabrication by inkjet 3D biofabrication for 3D tissue engineering. In: 2008 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science; 2008; Nagoya, Japan. Piscataway (NJ): IEEE; 2008: 451-6. doi:10.1109/MHS.2008.4752495. (in Engl)
9. Li X, Liu B, Pei B, Chen J, Zhou D, Peng J, Zhang X, Jia W, Xu T. Inkjet Bioprinting of Biomaterials. *Chem Rev*. 2020 Oct 14;120(19):10793-10833. (in Engl)
10. Herzog J, Franke L, Lai Y, Gomez Rossi P, Sachtleben J, Weuster-Botz D. 3D bioprinting of microorganisms: principles and applications. *Bioprocess Biosyst Eng*. 2024 Apr;47(4):443-461. doi: 10.1007/s00449-023-02965-3. (in Engl)
11. Wilson WC Jr, Boland T. Cell and organ printing 1: protein and cell printers. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol*. 2003 Jun;272(2):491-6. doi: 10.1002/ar.a.10057. (in Engl)
12. Zhang, Yi, Tse, Christopher, Rouholamin, Davood and Smith, Patrick. «Scaffolds for tissue engineering produced by inkjet printing» *Open Engineering*, 2012;2(3):325-335. (in Engl)
13. Miri AK, Mirzaee I, Hassan S, Mesbah Oskui S, Nieto D, Khademhosseini A, Zhang YS. Effective bioprinting resolution in tissue model fabrication. *Lab Chip*. 2019 Jun 7;19(11):2019-2037. doi: 10.1039/c8lc01037d. Epub 2019 May 13. (in Engl)
14. Guo, Y., Patanwala, H.S., Bogner, B. and Ma, A.W.K., «Inkjet and inkjet-based 3D printing: connecting fluid properties and printing performance», *Rapid Prototyping Journal*, 2017;23(3):562-576. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2016-0076> (in Engl)

15. Tetsuka H, Shin SR. Materials and technical innovations in 3D printing in biomedical applications. *J Mater Chem B*. 2020 Apr 21;8(15):2930-2950. doi: 10.1039/d0tb00034e. (in Engl)
16. Albanna M, Binder KW, Murphy SV, Kim J, Qasem SA, Zhao W, Tan J, El-Amin IB, Dice DD, Marco J, Green J, Xu T, Skardal A, Holmes JH, Jackson JD, Atala A, Yoo JJ. In Situ Bioprinting of Autologous Skin Cells Accelerates Wound Healing of Extensive Excisional Full-Thickness Wounds. *Sci Rep*. 2019 Feb 12;9(1):1856. doi: 10.1038/s41598-018-38366-w. (in Engl)
17. Inzana JA, Olvera D, Fuller SM, Kelly JP, Graeve OA, Schwarz EM, Kates SL, Awad HA. 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration. *Biomaterials*. 2014 Apr;35(13):4026-34. doi: 10.1016/j.biomaterials.2014.01.064. (in Engl)
18. Cui X, Breitenkamp K, Finn MG, Lotz M, D'Lima DD. Direct human cartilage repair using three-dimensional bioprinting technology. *Tissue Eng Part A*. 2012 Jun;18(11-12):1304-12. doi: 10.1089/ten.TEA.2011.0543. (in Engl)
19. Xu T, Baicu C, Aho M, Zile M, Boland T. Fabrication and characterization of bio-engineered cardiac pseudo tissues. *Biofabrication*. 2009 Sep;1(3):035001. doi: 10.1088/1758-5082/1/3/035001. (in Engl)
20. DeMel DC, Wagner GA, Maresca JA, Geibel JP. Application of a 3D bioprinter: jet technology for 'biopatch' development using cells on hydrogel supports. *Biotechniques*. 2024 Feb;76(2):52-62. doi: 10.2144/btn-2023-0052. (in Engl)
21. Ma Y, Deng B, He R, Huang P. Advancements of 3D bioprinting in regenerative medicine: Exploring cell sources for organ fabrication. *Heliyon*. 2024 Jan 17;10(3):e24593. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24593. (in Engl)
22. Byrne R, Carrico A, Lettieri M, Rajan AK, Forster RJ, Cumba LR. Bioinks and biofabrication techniques for biosensors development: A review. *Mater Today Bio*. 2024 Aug 5;28:101185. doi: 10.1016/j.mtbio.2024.101185. (in Engl)
23. Colina M, Serra P, Fernández-Pradas JM, Sevilla L, Morenza JL. DNA deposition through laser induced forward transfer. *Biosens Bioelectron*. 2005 Feb 15;20(8):1638-42. doi: 10.1016/j.bios.2004.08.047. (in Engl)
24. Bohandy J, Kim BF, Adrian FJ. Metal deposition from a supported metal film using an excimer laser. *J Appl Phys*. 1986;60(4):1538-9. <https://doi.org/10.1063/1.337287> (in Engl)
25. Barron JA, Wu P, Ladouceur HD, Ringeisen BR. Biological laser printing: a novel technique for creating heterogeneous 3-dimensional cell patterns. *Biomed Microdevices*. 2004 Jun;6(2):139-47. doi: 10.1023/b:bmm.0000031751.67267.9f. (in Engl)
26. Barron JA, Ringeisen BR, Kim H, Spargo BJ, Chrisey DB. Application of laser printing to mammalian cells. *Thin Solid Films*. 2004;453:383-7. DOI:10.1016/J.TSF.2003.11.161 (in Engl)
27. Mézel C, Souquet A, Hallo L, Guillemot F. Bioprinting by laser-induced forward transfer for tissue engineering applications: jet formation modeling. *Biofabrication*. 2010 Mar;2(1):014103. doi: 10.1088/1758-5082/2/1/014103. (in Engl)
28. Xiong R, Zhang Z, Chai W, Huang Y, Chrisey DB. Freeform drop-on-demand laser printing of 3D alginate and cellular constructs. *Biofabrication*. 2015 Dec 22;7(4):045011. doi: 10.1088/1758-5090/7/4/045011. (in Engl)
29. Li J, Chen M, Fan X, et al. Recent Advances in Bioprinting Techniques: Approaches, Applications and Future Prospects. *J Transl Med*. 2016;14:1-15. doi: 10.1186/s12967-016-1028-0. <https://doi.org/10.1186/s12967-016-1028-0>. (in Engl)
30. Pedroza-González SC, Rodríguez-Salvador M, Pérez-Benítez BE, Alvarez MM, Santiago GT. Bioinks for 3D Bioprinting: A Scientometric Analysis of Two Decades of Progress. *Int J Bioprint*. 2021 Apr 20;7(2):333. doi: 10.18063/ijb.v7i2.337. (in Engl)
31. Xiong R, Zhang Z, Chai W, Chrisey DB, Huang Y. Study of gelatin as an effective energy absorbing layer for laser bioprinting. *Biofabrication*. 2017 Jun 9;9(2):024103. doi: 10.1088/1758-5090/aa74f2. (in Engl)
32. Karakaidos P, Kryou K, Simigdala N, Klinakis A, Zergioti I. Laser Bioprinting of Cells Using UV and Visible Wavelengths: A Comparative DNA Damage Study. *Bioengineering (Basel)*. 2022 Aug 9;9(8):378. doi: 10.3390/bioengineering9080378. (in Engl)
33. Hall GN, Fan Y, Viellerobe B, Iazzolino A, Dimopoulos A, Poiron C, Clapies A, Luyten FP, Guillemot F, Papantoniou I. Laser-assisted bioprinting of targeted cartilaginous spheroids for high density bottom-up tissue engineering. *Biofabrication*. 2024 Aug 22;16(4). doi: 10.1088/1758-5090/ad6e1a. (in Engl)
34. Michael S, Sorg H, Peck CT, Koch L, Deiwick A, Chichkov B, Vogt PM, Reimers K. Tissue engineered skin substitutes created by laser-assisted bioprinting form skin-like structures in the dorsal skin fold chamber in mice. *PLoS One*. 2013;8(3):e57741. doi: 10.1371/journal.pone.0057741. (in Engl)
35. Xiong R, Zhang Z, Chai W, Huang Y, Chrisey DB. Freeform drop-on-demand laser printing of 3D alginate and cellular constructs. *Biofabrication*. 2015 Dec 22;7(4):045011. doi: 10.1088/1758-5090/7/4/045011. (in Engl)
36. Catros S, Fricain JC, Guillotin B, Pippenger B, Bareille R, Remy M, Lebraud E, Desbat B, Amédée J, Guillemot F. Laser-assisted bioprinting for creating on-demand patterns of human osteoprogenitor cells and nano-hydroxyapatite. *Biofabrication*. 2011 Jun;3(2):025001. doi: 10.1088/1758-5082/3/2/025001. (in Engl)
37. Chang J, Sun X. Laser-induced forward transfer based laser bioprinting in biomedical applications. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023 Aug 21;11:1255782. doi: 10.3389/fbioe.2023.1255782. (in Engl)
38. Zennifer A, Subramanian A, Sethuraman S. Design considerations of bioinks for laser bioprinting technique towards tissue regenerative applications. *Bioprinting*. 2022; 27: e00205. DOI:10.1016/j.bprint.2022.e00205 (in Engl)
39. Budharaju H, Sundaramurthi D, Sethuraman S. Embedded 3D bioprinting - An emerging strategy to fabricate biomimetic & large vascularized tissue constructs. *Bioact Mater*. 2023 Oct 21;32:356-384. doi: 10.1016/j.bioactmat.2023.10.012. (in Engl)
40. Cui X, Li J, Hartanto Y, Durham M, Tang J, Zhang H, Hooper G, Lim K, Woodfield T. Advances in Extrusion 3D Bioprinting: A Focus on Multicomponent Hydrogel-Based Bioinks. *Adv Healthc Mater*. 2020 Aug;9(15):e1901648. doi: 10.1002/adhm.201901648. (in Engl)
41. Zhang YS, Haghiashtiani G, Hübscher T, et al. 3D extrusion bioprinting. *Nat Rev Methods Primers*. 2021;1:75. doi:10.1038/s43586-021-00073-8. (in Engl)
42. Ravanbakhsh H, Karamzadeh V, Bao G, Mongeau L, Juncker D, Zhang YS. Emerging Technologies in Multi-Material Bioprinting. *Adv Mater*. 2021 Dec;33(49):e2104730. doi: 10.1002/adma.202104730. (in Engl)
43. Mandrycky C, Wang Z, Kim K, Kim DH. 3D bioprinting for engineering complex tissues. *Biotechnol Adv*. 2016 Jul-Aug;34(4):422-434. doi: 10.1016/j.biotechadv.2015.12.011. (in Engl)
44. Tripathi S, Mandal SS, Bauri S, Maiti P. 3D bioprinting and its innovative approach for biomedical applications. *MedComm*. 2022 Dec 24;4(1). doi:10.1002/mco2.194. (in Engl)
45. Perez-Valle A, Del Amo C, Andia I. Overview of Current Advances in Extrusion Bioprinting for Skin Applications. *Int J Mol Sci*. 2020 Sep 12;21(18):6679. doi: 10.3390/ijms21186679 (in Engl)
46. Dolati F, Yu Y, Zhang Y, De Jesus AM, Sander EA, Ozbolat IT. In vitro evaluation of carbon-nanotube-reinforced bioprintable vascular conduits. *Nanotechnology*. 2014 Apr 11;25(14):145101. doi: 10.1088/0957-4484/25/14/145101 (in Engl)
47. Nedrelov DS, Townsend JM, Detamore MS. Osteochondral Regeneration With Anatomical Scaffold 3D-Printing-Design Considerations for Interface Integration. *J Biomed Mater Res A*. 2024 Oct 10. doi: 10.1002/jbm.a.37804 (in Engl)
48. You F, Eames BF, Chen X. Application of Extrusion-Based Hydrogel Bioprinting for Cartilage Tissue Engineering. *Int J Mol Sci*. 2017 Jul 23;18(7):1597. doi: 10.3390/ijms18071597. Chen K, Jiang E, Wei X, Xia Y, Wu Z, Gong Z, Shang Z, Guo S. The acoustic droplet printing of functional tumor microenvironments. *Lab Chip*. 2021 Apr 20;21(8):1604-1612. doi: 10.1039/d1lc00003a. (in Engl)
49. Fornetti E, De Paolis F, Fuoco C, Bernardini S, Giannitelli SM, Rainer A, Seliktar D, Magdini F, Baldi J, Biagini R, Cannata S, Testa S, Gargioli C. A novel extrusion-based 3D bioprinting system for skeletal muscle tissue engineering. *Biofabrication*. 2023 Feb 3;15(2). doi: 10.1088/1758-5090/acb573 (in Engl)
50. Wu T, Gao YY, Su J, Tang XN, Chen Q, Ma LW, Zhang JJ, Wu JM, Wang SX. Three-dimensional bioprinting of artificial ovaries by an extrusion-based method using gelatin-methacryloyl bioink. *Climacteric*. 2022 Apr;25(2):170-178. doi: 10.1080/13697137.2021.1921726 (in Engl)

51. Gospodinova A, Nankov V, Tomov S, Redzheb M, Petrov PD. Extrusion bioprinting of hydroxyethylcellulose-based bioink for cervical tumor model. *Carbohydr Polym.* 2021 May 15;260:117793. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.117793 (in Engl)
52. Wu, Z., Pan, M., Wang, J., Wen, B., Lu, L., and Ren, H. (2022). Acoustofluidics for cell patterning and tissue engineering. *Eng. Regen.* 3 (4), 397–406. doi:10.1016/j.engreg.2022.08.005 (in Engl)
53. Orme B, Torun H, Unthank M, Fu YQ, Ford B, Agrawal P. Capillary wave tweezer. *Sci Rep.* 2024 May 30;14(1):12448. doi: 10.1038/s41598-024-63154-0. (in Engl)
54. Mierke CT. Bioprinting of Cells, Organoids and Organs-on-a-Chip Together with Hydrogels Improves Structural and Mechanical Cues. *Cells.* 2024 Oct 1;13(19):1638. doi: 10.3390/cells13191638.(in Engl)
55. Bouyer C, Chen P, Güven S, Demirtaş TT, Nieland TJ, Padilla F, Demirci U. A Bio-Acoustic Levitational (BAL) Assembly Method for Engineering of Multilayered, 3D Brain-Like Constructs, Using Human Embryonic Stem Cell Derived Neuro-Progenitors. *Adv Mater.* 2016 Jan 6;28(1):161-7. doi: 10.1002/adma.201503916. (in Engl)
56. Armstrong JPK, Puetzer JL, Serio A, Guex AG, Kapnisi M, Breant A, Zong Y, Assal V, Skaalure SC, King O, Murty T, Meinert C, Franklin AC, Bassindale PG, Nichols MK, Terracciano CM, Huttmacher DW, Drinkwater BW, Klein TJ, Perriman AW, Stevens MM. Engineering Anisotropic Muscle Tissue using Acoustic Cell Patterning. *Adv Mater.* 2018 Oct;30(43):e1802649. doi: 10.1002/adma.201802649. (in Engl)
57. Serpooshan V, Chen P, Wu H, Lee S, Sharma A, Hu DA, Venkatraman S, Ganesan AV, Usta OB, Yarmush M, Yang F, Wu JC, Demirci U, Wu SM. Bioacoustic-enabled patterning of human iPSC-derived cardiomyocytes into 3D cardiac tissue. *Biomaterials.* 2017 Jul;131:47-57. doi: 10.1016/j.biomaterials.2017.03.037. (in Engl)
58. Parfenov VA, Koudan EV, Krokhamal AA, Annenkova EA, Petrov SV, Pereira FDAS, Karalkin PA, Nezhurina EK, Gryadunova AA, Bulanova EA, Sapozhnikov OA, Tsysar SA, Liu K, Oosterwijk E, van Beuningen H, van der Kraan P, Granneman S, Engelkamp H, Christianen P, Kasyanov V, Khesuani YD, Mironov VA. Biofabrication of a Functional Tubular Construct from Tissue Spheroids Using Magnetoacoustic Levitational Directed Assembly. *Adv Healthc Mater.* 2020 Dec;9(24):e2000721. doi: 10.1002/adhm.202000721. (in Engl)
59. Chansoria P, Narayanan LK, Schuchard K, Shirwaiker RMin JH, Patel M, Koh WG. Incorporation of Conductive Materials into Hydrogels for Tissue Engineering Applications. *Polymers (Basel).* 2018 Sep 28;10(10):1078. doi: 10.3390/polym10101078. (in Engl)
60. Chen H, Wu Z, Gong Z, Xia Y, Li J, Du L, Zhang Y, Gao X, Fan Z, Hu H, Qian Q, Ding Z, Guo S. Acoustic Bioprinting of Patient-Derived Organoids for Predicting Cancer Therapy Responses. *Adv Healthc Mater.* 2022 Jul;11(13):e2102784. doi: 10.1002/adhm.202102784. (in Engl)
61. Guo F, Mao Z, Chen Y, Xie Z, Lata JP, Li P, Ren L, Liu J, Yang J, Dao M, Suresh S, Huang TJ. Three-dimensional manipulation of single cells using surface acoustic waves. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2016 Feb 9;113(6):1522-7. doi: 10.1073/pnas.1524813113.(in Engl)
62. Sabzevari A, Rayat Pisheh H, Ansari M, Salati A. Progress in bioprinting technology for tissue regeneration. *J Artif Organs.* 2023 Dec;26(4):255-274. doi: 10.1007/s10047-023-01394-z. (in Engl)
63. Abdel Fattah AR, Meleca E, Mishriki S, Lelic A, Geng F, Sahu RP, Ghosh S, Puri IK. In Situ 3D Label-Free Contactless Bioprinting of Cells through Diamagnetophoresis. *ACS Biomater Sci Eng.* 2016 Dec 12;2(12):2133-2138. doi: 10.1021/acsbomaterials.6b00614. (in Engl)
64. Tseng H, Gage JA, Shen T, Haisler WL, Neeley SK, Shiao S, Chen J, Desai PK, Liao A, Hebel C, Raphael RM, Becker JL, Souza GR. A spheroid toxicity assay using magnetic 3D bioprinting and real-time mobile device-based imaging. *Sci Rep.* 2015 Sep 14;5:13987. doi: 10.1038/srep13987.(in Engl)
65. Abdel Fattah AR, Mishriki S, Kammann T, Sahu RP, Geng F, Puri IK. 3D cellular structures and co-cultures formed through the contactless magnetic manipulation of cells on adherent surfaces. *Biomater Sci.* 2018 Feb 27;6(3):683-694. doi: 10.1039/c7bm01050h. (in Engl)
66. Ergene E, Liman G, Yilgor P, Demirel G. Magnetically actuated GelMA-based scaffolds as a strategy to generate complex bioprinted tissues. *Adv Mater Technol.* 2024;9:2400119. doi:10.1002/admt.202400119. (in Engl)
67. Souza GR, Tseng H, Gage JA, Mani A, Desai P, Leonard F, Liao A, Longo M, Refuerzo JS, Godin B. Magnetically Bioprinted Human Myometrial 3D Cell Rings as A Model for Uterine Contractility. *Int J Mol Sci.* 2017 Mar 23;18(4):683. doi: 10.3390/ijms18040683.(in Engl)
68. Kryuchkova A, Savin A, Kiseleva A, Dukhinova M, Krivoschapkina E, Krivoschapkin P. Magnetothermal spider silk-based scaffolds for cartilage regeneration. *Int J Biol Macromol.* 2023 Dec 31;253(Pt 6):127246. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.127246. (in Engl)
69. Campbell PG, Weiss LE. Tissue engineering with the aid of inkjet printers. *Expert Opin Biol Ther.* 2007 Aug;7(8):1123-7. doi: 10.1517/14712598.7.8.1123. (in Engl)
70. Samandari M, Mostafavi A, Quint J, Memic A, Tamayol A. In situ bioprinting: intraoperative implementation of regenerative medicine. *Trends Biotechnol.* 2022 Oct;40(10):1229-1247. doi: 10.1016/j.tibtech.2022.03.009. (in Engl)
71. Singh S, Choudhury D, Yu F, Mironov V, Naing MW. In situ bioprinting - Bioprinting from benchside to bedside? *Acta Biomater.* 2020 Jan 1;101:14-25. doi: 10.1016/j.actbio.2019.08.045. (in Engl)
72. Yang Y, Yu Z, Lu X, Dai J, Zhou C, Yan J, Wang L, Wang Z, Zang J. Minimally invasive bioprinting for in situ liver regeneration. *Bioact Mater.* 2023 Mar 29;26:465-477. doi: 10.1016/j.bioactmat.2023.03.011. (in Engl)
73. Cheng RY, Eylert G, Gariepy JM, He S, Ahmad H, Gao Y, Priore S, Hakimi N, Jeschke MG, Günther A. Handheld instrument for wound-conformal delivery of skin precursor sheets improves healing in full-thickness burns. *Biofabrication.* 2020 Feb 3;12(2):025002. doi: 10.1088/1758-5090/ab6413. (in Engl)
74. Ma K, Zhao T, Yang L, Wang P, Jin J, Teng H, Xia D, Zhu L, Li L, Jiang Q, Wang X. Application of robotic-assisted in situ 3D printing in cartilage regeneration with HAMA hydrogel: An in vivo study. *J Adv Res.* 2020 Jan 28;23:123-132. doi: 10.1016/j.jare.2020.01.010. (in Engl)
75. Cao P, Tao L, Gong J, Wang T, Wang Q, Ju J, Zhang Y. 4D printing of a sodium alginate hydrogel with step-wise shape deformation based on variation of crosslinking density. *ACS Applied Polymer Materials.* 2021 Nov 5;3(12):6167-75. doi: 10.1021/acsapm.1c01034 (in Engl)
76. Xie M, Shi Y, Zhang C, Ge M, Zhang J, Chen Z, Fu J, Xie Z, He Y. In situ 3D bioprinting with bioconcrete bioink. *Nat Commun.* 2022 Jun 23;13(1):3597. doi: 10.1038/s41467-022-30997-y. (in Engl)
77. Quint JP, Mostafavi A, Endo Y, Panayi A, Russell CS, Nourmahad A, Wiseman C, Abbasi L, Samandari M, Sheikh A, Nuutila K, Sinha I, Tamayol A. In Vivo Printing of Nanoenabled Scaffolds for the Treatment of Skeletal Muscle Injuries. *Adv Healthc Mater.* 2021 May;10(10):e2002152. doi: 10.1002/adhm.202002152.(in Engl)
78. Min JH, Patel M, Koh WG. Incorporation of Conductive Materials into Hydrogels for Tissue Engineering Applications. *Polymers (Basel).* 2018 Sep 28;10(10):1078. doi: 10.3390/polym10101078.(in Engl)
79. Russell CS, Mostafavi A, Quint JP, Panayi AC, Baldino K, Williams TJ, Daubendiek JG, Hugo Sánchez V, Bonick Z, Trujillo-Miranda M, Shin SR, Pourquie O, Salehi S, Sinha I, Tamayol A. In Situ Printing of Adhesive Hydrogel Scaffolds for the Treatment of Skeletal Muscle Injuries. *ACS Appl Bio Mater.* 2020 Mar 16;3(3):1568-1579. doi: 10.1021/acsabm.9b01176.(in Engl)
80. Fortunato GM, Sigismondi S, Nicoletta M, Condino S, Montemurro N, Vozzi G, Ferrari V, De Maria C. Analysis of the Robotic-Based In Situ Bioprinting Workflow for the Regeneration of Damaged Tissues through a Case Study. *Bioengineering.* 2023; 10(5):560. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10050560> (in Engl)
81. Urciuolo A, Poli I, Brandolino L, Raffa P, Scattolini V, Laterza C, Giobbe GG, Zambaiti E, Selmin G, Magnussen M, Brigo L, De Coppi P, Salmasso S, Giomo M, Elvassore N. Intravital three-dimensional bioprinting. *Nat Biomed Eng.* 2020 Sep;4(9):901-915. doi: 10.1038/s41551-020-0568-z. (in Engl)