

ОБЩЕСТВЕННОЕ ЗДОРОВЬЕ, ОРГАНИЗАЦИЯ И СОЦИОЛОГИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

УДК 60:575.112(048.8)
EDN: HCBZEJ
<https://doi.org/10.15275/ssmj2102194>

Обзор

ВЛИЯНИЕ БИОИНЖЕНЕРНЫХ И БИОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ (ОБЗОР)

И.В. Видяшева, М.В. Еругина, А.А. Архангельская, Д.В. Тупикин, В.Н. Стрижевская, М.С. Марадудин, Х.С. Романова

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского» Минздрава России, Саратов, Россия

INFLUENCE OF BIOENGINEERING AND BIOINFORMATICS TECHNOLOGIES ON PUBLIC HEALTH STATUS

I. V. Vidiashcheva, M. V. Erugina, A. A. Arkhangelskaya, D. V. Tupikin, V. N. Strizhevskaya, M. S. Maradudin, Kh. S. Romanova
V. I. Razumovsky Saratov State Medical University, Saratov, Russia

Для цитирования: Видяшева И.В., Еругина М.В., Архангельская А.А., Тупикин Д.В., Стрижевская В.Н., Марадудин М.С., Романова Х.С. Влияние биоинженерных и биоинформационных технологий на состояние здоровья населения (обзор). Саратовский научно-медицинский журнал. 2025; 21 (2): 194–200. EDN: HCBZEJ. <https://doi.org/10.15275/ssmj2102194>

Аннотация. Цель: определить наиболее значимые биоинженерные и биоинформационные технологии, направленные на сохранение и укрепления здоровья населения. Методика написания обзора. Систематический обзор выполнен по методологии PRISMA (Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses) с использованием баз данных PubMed, eLibrary, Google Scholar, CyberLeninka. Глубина поиска — с 2006 по 2025 г. Для написания обзора использовано 50 источников. Заключение. Обзор научных публикаций позволяет утверждать значимость потенциала развития биоинженерных и биоинформационных технологий для улучшения состояния здоровья населения. Анализ исследований, ориентированных на редактирование генома, выявил появление новых технологий (CRISPR/Cas9, CAR-T) в терапии ранее неизлечимых и орфанных заболеваний. Работы в области биоинформатики, связанные с созданием и использованием геномных/клинических баз данных (TCGA, GWAS), направлены на идентификацию факторов риска и предикторов ряда заболеваний человека. Современные тенденции развития регенеративной медицины направлены на конструирование специализированных тканей и органов (тканеинженерные конструкции, 3D-печатные модели), определяют сокращение сроков реабилитации и возвращения пациентов к трудовой деятельности. В настоящее время назрела необходимость оценки медицинской, экономической и социальной эффективности каждого из рассмотренных направлений с последующим обоснованием организационных технологий их интеграции в практику здравоохранения.

Ключевые слова: здоровье населения, биоинженерия, биоинформатика, биотехнология, регенеративная медицина

For citation: Vidiashcheva IV, Erugina MV, Arkhangelskaya AA, Tupikin DV, Strizhevskaya VN, Maradudin MS, Romanova KhS. Influence of bioengineering and bioinformatics technologies on public health status. Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2025; 21 (2): 194–200. (In Russ.) EDN: HCBZEJ. <https://doi.org/10.15275/ssmj2102194>

Abstract. Objective: identify the most significant bioengineering and bioinformatics technologies aimed at preserving and strengthening the health of the population. Methodology for writing a review. The systematic review was performed on the PRISMA methodology applying the PubMed, eLibrary, Google Scholar, CyberLeninka databases. The search period was from 2006 to 2025. 50 sources were used to write the review. Conclusion. A review of scientific works suggests a significant potential of the development of bioengineering and bioinformatics technologies to improve population health. Analysis of studies focused on genome editing revealed the emergence of new technologies (CRISPR/Cas9, CAR-T) in the treatment of previously incurable and orphan diseases. Bioinformatics researches, related to the genome/clinic database (TCGA, GWAS), focus on the identifying of risk factors and predictors of human diseases. The modern tendency in regenerative medicine is aimed at the creating of the individual products for tissues and organs recovering (3D-printed models). They help to reduce the rehabilitation periods and return the patients to the working life. At the present, there are pressing issues of assessment the medical, economic and social effectiveness of presented here technologies. They can be integrated into healthcare system after justification of the organizational technologies.

Keywords: population health, bioengineering, bioinformatics, biotechnology, regenerative medicine

Введение. Неблагоприятная медико-демографическая ситуация в стране требует развития современных биомедицинских технологий, обеспечивающих

значимое повышение эффективности профилактики, лечения и реабилитации населения в целях сохранения трудового потенциала и снижения финансового бремени на систему здравоохранения.

Пополнение биоинформационных баз данных является основой для разработки и поиска предикторов многих социально-значимых заболеваний

Ответственный автор — Ирина Викторовна Видяшева
Corresponding author — Irina V. Vidiashcheva
E-mail: irinabiochemist@yandex.ru

[1]. Для снижения рисков патологии при протекании беременности и родов необходимо унифицировать программу по созданию генетических карт репродуктивного здоровья и внедрять инновационные технологии в пренатальной диагностике [2].

Широкое внедрение в практику инновационных методов генетической и клеточной инженерии для лечения пациентов с орфанными и хроническими заболеваниями, считавшимися ранее не излечимыми [3, 4], может способствовать снижению экономической нагрузки на систему здравоохранения. Для продления долголетия и трудового возраста населения необходима и возможна переориентация на схемы лечения гериатрической направленности [5].

Цель — определить наиболее значимые биоинженерные и биоинформационные технологии, направленные на сохранение и укрепления здоровья населения.

Методика написания обзора. Систематический обзор выполнен по методологии PRISMA (Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses — «Предпочтительные элементы отчетности для систематических обзоров и метаанализов») с использованием баз данных PubMed, eLibrary, CyberLeninka, Google Scholar. Глубина поиска — с 2006 по 2025 г.

Поиск проводился по следующим ключевым словам: “bioengineering”, “bioinformatics”, “regenerative medicine”, “tissue engineering”, “genetic engineering”, “population health” включая их русскоязычный перевод: «биоинженерия», «биоинформатика», «регенеративная медицина», «тканевая инженерия», «генная инженерия», «здоровье населения».

Были проанализированы полнотекстовые источники, для того чтобы определить, какие публикации имеют отношение к цели обзора. Критериями исключения были дублирующие публикации, обзорные статьи без детальных описаний научных результатов, авторские мнения. Преобладающее число публикаций по данной теме представлено в англоязычном секторе. После использования критериев исключения в обзор включены 50 источников для раскрытия указанной темы (рисунок).

Результаты обзора. Генная инженерия — основа современной биотехнологии. До недавних пор в здравоохранении лечебные мероприятия в отношении пациентов с неизлечимыми заболеваниями были направлены преимущественно на оказание паллиативной помощи.

В настоящее время генетическая инженерия позволяет разработать терапию заболеваний человека, ранее считавшихся неизлечимыми: болезни Альцгеймера [6], мышечной дистрофии Дюшенна [7], некоторых заболеваний глаз [8], гемофилии [9], дистрофического буллезного эпидермолиза [10], X-сцепленной миотубулярной миопатии [11] и других, обеспечивая долгосрочный клинический эффект [12].

С быстрым развитием функциональной геномики появились инструменты инженерных нуклеаз [13], в том числе революционная технология CRISPR/Cas9 (кластеризованных коротких палиндромных повторов), что сделало процесс редактирования проще и продуктивнее [14].

Наиболее частым инструментом для редактирования генома выступают gAAV — рекомбинантные аденоассоциированные вирусные векторы. Продукты, изготовленные на их основе, включают терапию



Отбор статей для обзора в соответствии с PRISMA-методологией

гемофилии [15], RPE65-ассоциированной ретиальной дистрофии [16], спинальной мышечной атрофии [17] и т.д.

На текущий момент в западных странах для лечения онкогематологических заболеваний применяется ряд терапий на основе технологии CAR-T (терапия генномодифицированными Т-клетками с химерными рецепторами антигена) [18].

В России применением CAR-T на базе ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дмитрия Рогачева» Минздрава России занимается группа под руководством Михаила Масчана [19].

Достижения тканевой инженерии. Тканевая инженерия ориентирована, как правило, на пациентов с тяжелыми заболеваниями. Существующие технологии позволяют обойтись без высокоинвазивного хирургического вмешательства и сократить сроки пребывания пациентов в клинических отделениях.

Носители для клеток могут быть изготовлены из натуральных (коллаген, децеллюляризованные матрицы) или синтетических материалов [20, 21].

Трехмерная структура необходима для размножения клеток и формирования тканей или органов, которые могут сохранить свою специализированную морфологию.

Децеллюляризация — это процесс, в ходе которого можно получить бесклеточный каркас внеклеточного матрикса [22]. Ряд исследований показал, что внеклеточный матрикс обладает биоиндуктивными свойствами, сравнимыми со свойствами нативной ткани: клеточным хемотаксисом, прикреплением, миграцией, пролиферацией [23].

Многочисленные исследования позволили успешно получить каркасы практически из всех органов млекопитающих с последующим применением в регенерации костной ткани [24], почек [25], эндодонта [26] и т.д.

Существует подход в инженерии тканей без использования носителей, который позволяет клеткам вырабатывать собственный внеклеточный матрикс и самособираться в трехмерные структуры [27]. Ряд современных исследований направлен на 3D-конструирование тканей с помощью внешнего магнитного поля [28].

Преимущества 3D-печати. 3D-печать используется в широком спектре медицинских учреждений: кардиоторакальной хирургии [29], нейрохирургии, челюстно-лицевой хирургии [30], офтальмологии, отоларингологии, ортопедии [31], сосудистой хирургии и т.д.

3D-печать открывает возможность моделирования индивидуальных протезов и хирургических инструментов на основе анатомии конкретного пациента [32]. Разработка и внедрение инновационных анатомических протезов ведет к снижению затрат за счет технологии аддитивного производства [33] и повышает качество медицинской помощи.

Биоматериалы, используемые для биопечати, совместимы с физиологией человека, могут включать как полимеры природного происхождения (альгинат, желатин, коллаген, фибрин и т.д.) и синтетические (например, полиэтиленгликоль), так и их композиции [34].

Использование биопечатных тканей позволяет экспериментаторам и обучающимся моделировать механизмы развития заболеваний и испытывать лекарственные препараты, сокращая расходы здравоохранения на циклы исследования и разработки [35].

Перспективы клеточной терапии. Технология эмбриональных стволовых клеток является одной из самых ранних технологий регенеративной медицины. Применение методов на основе эмбриональных стволовых клеток остается ограниченным из-за потенциального риска развития опухолей, а также этических дилемм [36].

Проблемы, связанные с применением эмбриональных стволовых клеток, может разрешить концепция индуцированных плюрипотентных стволовых клеток. К. Takahashi и S. Yamanaka обнаружили, что октамерный транскрипционный фактор Oct4, ген Y-хромосомы (SRY) — бокс 2 и ген *Nanog* функционируют как основные факторы транскрипции, поддерживающие плюрипотентность [37].

Индукцированные плюрипотентные стволовые клетки можно перепрограммировать в клетки определенного типа, которые могут быть использованы для лечения сердечной недостаточности [38], восстановления зрения [39] и т.д. Замещение β-клеток представляет собой мощную платформу в трансплантационной медицине [40].

ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА одним из первых в России стал заниматься разработкой биомедицинских клеточных продуктов на основе аутологичных клеток [41].

Актуальными аспектами в здравоохранении является острое применение медикаментозных средств и назначение минимального количества лекарственных препаратов при лечении пациентов старшей возрастной группы с учетом их коморбидности. Клеточные препараты показывают высокую эффективность с меньшим количеством побочных эффектов, что особенно актуально при лечении пациентов старшей возрастной группы [5, 42].

Биоинформационные технологии. Онкологические заболевания являются одним из главных вызовов экономике и здравоохранению во всем мире. Опухоли способны вырабатывать устойчивость к определенным лекарственным препаратам, поэтому эта область медицины нуждается в создании баз данных [43]. В области исследований рака существует несколько крупных баз данных, например Атлас генома рака (TCGA) [3].

Биоинформационный анализ позволяет объяснить вклад «внутренних» и «внешних» факторов в развитие заболеваний, выявить механизм взаимодействия лекарственного средства с молекулярной мишенью для понимания взаимосвязи между мутациями и дифференциальными терапевтическими реакциями различных групп населения [44, 45].

Анализ экспрессии генов, определение предполагаемых функций некодирующих РНК, выявления генов-кандидатов, влияющих на развитие заболевания, позволяют обнаруживать уникальные сигналы, которые могут использоваться для решения прогностических задач [1] и своевременно изменять схемы лечения онкологических заболеваний.

Общегеномные ассоциативные исследования (GWAS) связывают наличие генетических вариаций и заболевание. GWAS, основанные на моделях линейной регрессии, были успешны в выявлении менделевских признаков и заболеваний, в том числе социально значимых, таких как сахарный диабет 1-го типа [4].

Инфекционная заболеваемость и смертность остаются на высоком уровне, что представляет

важную проблему для здравоохранения [46]. Традиционные биологические технологии показали свои ограничения при борьбе с COVID-19, чтобы противодействовать пандемии, применялись и были эффективными биоинформационные методы [47].

Биоинформационные картографические базы данных Complement Map Database (CMA) и Drug directionality Map (DMAP) помогают выявить эволюционные и метаболические различия в метаболических путях для обнаружения родственных штаммов, что способствует разработке лекарственных препаратов против патогенных микроорганизмов [48].

Одной из важных областей применения биоинформатики в здравоохранении является ранняя диагностика патологических состояний с помощью метаболомики. Ее инструменты используются для поиска прогностических маркеров злокачественных,

наследственных и инфекционных заболеваний при скрининге различных групп населения, включая беременных и новорожденных [49, 50].

Авторами подготовлена таблица, включающая краткие выводы по блокам тем, исследуемых в обзоре, с результатами отобранных для анализа научных работ.

Заключение. Биоинженерные и биоинформационные инновационные технологии в условиях демографического кризиса и ограниченности трудовых ресурсов могут повысить численность лиц, способных продолжать трудовую деятельность (не только в трудоспособном возрасте), а также снизить экономическую нагрузку на систему здравоохранения. Закрывать эту потребность способны новые подходы терапии социально значимых и ранее неизлечимых заболеваний (CRISPR/Cas9, CAR-T). Современные

Краткие выводы по блокам тем, исследуемых в обзоре

Подход биоинженерии/биоинформатики	Авторы, название статьи, издание, год, ссылка	Основные достижения	Перспективы развития для сферы здравоохранения
Редактирование генома	Stadtmauer EA, Fraietta JA, Davis MM, et al. CRISPR-engineered T cells in patients with refractory cancer. <i>Science</i>. 2020 [14] Wang M, Munoz J, Goy A, et al. CAR T-cell therapy in relapsed or refractory mantle-cell lymphoma. <i>N Engl J Med</i>. 2020 [18] Budd Haeberlein S, Aisen PS, Barkhof F, et al. Two randomized phase 3 studies of aducanumab in early Alzheimer's disease. <i>J Prev Alzheimers Dis</i>. 2022 [6]	CRISPR-технология для терапии генетических заболеваний CAR-T терапия для лечения ряда заболеваний Генная инженерия в лечении и профилактике генетических заболеваний (болезнь Альцгеймера)	Внедрение технологии редактирования генома для ранее неизлечимых хронических и орфанных заболеваний снизит экономическую нагрузку на систему здравоохранения, уменьшит первичный выход на инвалидность
Тканеинженерные конструкции	Gupta SK, Mishra NC, Dhasmana A. Decellularization methods for scaffold fabrication. <i>Methods Mol Biol</i>. 2018 [22] Lin T, Liu S, Chen S, et al. Hydrogel derived from porcine decellularized nerve tissue as a promising biomaterial for repairing peripheral nerve defects. <i>Acta Biomater</i>. 2018 [23] Douglas TEL, Sobczyk K, Łapa A, et al. Ca: Mg: Zn: CO₃ and Ca: Mg: CO₃-tri- and bi-elemental carbonate microparticles for novel injectable self-gelling hydrogel-microparticle composites for tissue regeneration. <i>Biomed Mater</i>. 2017 [21] Vidiasheva IV, Abalymov AA, Kurochkin MA, et al. Transfer of cells with uptaken nanocomposite, magnetite-nanoparticle functionalized capsules with electromagnetic tweezers. <i>Biomater Sci</i>. 2018 [28]	Получены каркасы из внеклеточного децеллюляризованного матрикса Изучены механизмы взаимодействия матрикса с клетками Получены материалы, которые обеспечивают механическую прочность и благоприятную среду для клеток Разработана стратегия конструирования тканей с помощью внешнего магнитного поля	Ожидаемое создание жизнеспособных и полноценно функционирующих искусственных копий отдельных тканей человека и некоторых органов обеспечивает ускоренную регенерацию поврежденных органов и тканей, уменьшение риска хирургического вмешательства, тем самым способствует повышению медицинской, социальной и экономической эффективности здравоохранения
3D-печать	Dey M, Ozbolat IT. 3D bioprinting of cells, tissues and organs. <i>Sci Rep</i>. 2020 [34] Frame M, Huntley JS. Rapid prototyping in orthopaedic surgery: A user's guide. <i>Sci World J</i>. 2012 [32]	Биопечать клеток из натуральных и/или синтетических биоматериалов с высоким разрешением Биопечать индивидуальных протезов и хирургических инструментов	Ожидается развитие аддитивной анатомической печати, которая позволит сократить экономические затраты на производство средств реабилитации и повысить медицинскую и социальную эффективность реабилитации; создавать инновационные концепции для исследовательской, медицинской и образовательной деятельности

Окончание табл.

Подход биоинженерии/биоинформатики	Авторы, название статьи, издание, год, ссылка	Основные достижения	Перспективы развития для сферы здравоохранения
Клеточная терапия	Menasché P, Vanneaux V, Hagège A, et al. Human embryonic stem cell-derived cardiac progenitors for severe heart failure treatment: First clinical case report. <i>Eur Heart J</i>. 2015 [38] Schwartz SD, Regillo CD, Lam BL, et al. Human embryonic stem cell-derived retinal pigment epithelium in patients with age-related macular degeneration and Stargardt's macular dystrophy: Follow-up of two open-label phase 1/2 studies. <i>Lancet</i>. 2015 [39] Forest DL, Johnson LV, Clegg DO. Cellular models and therapies for age-related macular degeneration. <i>Dis Model Mech</i>. 2015 [42]	Получены различные типы клеток с помощью индуцированных плюрипотентных стволовых клеток (<i>in vitro</i>) Клеточные препараты показывают высокую эффективность с меньшим количеством побочных эффектов	Технология направлена на выращивание органов, что позволит сократить очередь на трансплантацию, способствовать возврату пациентов к трудовой деятельности; создавать щадящие терапевтические платформы для пациентов старшей возрастной группы
Биоинформационные технологии	Kennedy AD, Pappan KL, Donti TR, et al. Elucidation of the complex metabolic profile of cerebrospinal fluid using an untargeted biochemical profiling assay. <i>Mol Genet Metab</i>. 2017 [50] Grossman RL, Heath AP, Ferretti V, et al. Toward a shared vision for cancer genomic data. <i>N Engl J Med</i>. 2016 [3] Bradfield J. P., Qu, H.-Q., Wang, K, et al. A genome-wide meta-analysis of six type 1 diabetes cohorts identifies multiple associated loci. <i>PLoS Genet</i>. 2011 [4] Chan JFW, Kok KH, Zhu Z, et al. Genomic characterization of the 2019 novel human-pathogenic coronavirus isolated from a patient with atypical pneumonia after visiting Wuhan. <i>Emerg Microbes Infect</i>. 2020 [47]	Поиск прогностических маркеров злокачественных, наследственных и инфекционных заболеваний Разработаны лекарственные препараты, в том числе противораковые Созданы базы данных в борьбе с наследственными заболеваниями Противодействия вирусным и инфекционным заболеваниям, в том числе COVID-19	Технология позволяет создавать диагностические биомаркеры и мультиомные подходы для скрининга различных групп населения (в том числе беременных женщин и новорожденных) с целью выявления рисков развития различных заболеваний

тенденции в области регенеративной медицины нацелены на конструирование уникальных персонализированных средств реабилитации пациентов и сокращение срока их пребывания в медицинских учреждениях (тканеинженерные конструкции, 3D-печатные модели), в то же время клеточные технологии могут способствовать сохранению кадрового потенциала среди лиц пенсионного возраста, которые составляют значительную долю трудового потенциала страны. Использование геномных/клинических баз данных (TCGA, GWAS) направлено на мониторинг состояния здоровья (идентификация факторов риска и предикторов заболеваний), что способствует повышению эффективности профилактических мероприятий, раннему выявлению групп риска их развития и позволяет снизить долю лиц с тяжелым течением заболеваний.

Обзор научных публикаций позволяет сделать вывод о значимом потенциале развития биоинженерных и биоинформационных технологий для улучшения состояния здоровья населения. В настоящее время назрела необходимость оценки медицинской, экономической и социальной эффективности каждого из рассмотренных направлений с последующим обоснованием организационных технологий интеграции в практику здравоохранения.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References (Список источников)

- van Dam S, Vösa U, van der Graaf A, et al. Gene co-expression analysis for functional classification and gene-disease predictions. *Brief Bioinform*. 2018;19(4):575–92. DOI:10.1093/bib/bbw139
- Kascheeva TK, Kuznetsova TV, Baranov VS. New technologies and trends of prenatal diagnostics. *Journal of Obstetrics and Women's Diseases*. 2017;66(2):33–9. (In Russ.) Кашеева Т.К., Кузнецова Т.В., Баранов В.С. Новые технологии и тенденции развития пренатальной диагностики. *Журнал акушерства и женских болезней*. 2017;66(2):33–9. DOI:10.17816/JOWD66233-39
- Grossman RL, Heath AP, Ferretti V, et al. Toward a shared vision for cancer genomic data. *N Engl J Med*. 2016;375(12):1109–12. DOI:10.1056/NEJMp1607591
- Bradfield JP, Qu H-Q, Wang K, et al. A genome-wide meta-analysis of six type 1 diabetes cohorts identifies multiple associated loci. *PLoS Genet*. 2011;7(9):e1002293. DOI:10.1371/journal.pgen.1002293
- Gong L, Chen B, Zhang J, et al. Human ESC-sEVs alleviate age-related bone loss by rejuvenating senescent bone marrow-derived mesenchymal stem cells. *J Extracell Vesicles*. 2020;9(1):1800971. DOI:10.1080/20013078.2020.1800971
- Budd Haeberlein S, Aisen PS, Barkhof F, et al. Two randomized phase 3 studies of aducanumab in early Alzheimer's disease. *J Prev Alzheimers Dis*. 2022;9(2):197–210. DOI:10.14283/jpad.2022.30
- Bowles DE, McPhee SW, Li C, et al. Phase 1 gene therapy for Duchenne muscular dystrophy using a translational optimized AAV vector. *Mol Ther*. 2012;20(2):443–55. DOI:10.1038/mt.2011.237
- Constable IJ, Lai CM, Magno AL, et al. Gene therapy in neovascular age-related macular degeneration: Three-year follow-up of a phase 1 randomized dose escalation trial. *Am J Ophthalmol*. 2017;177:150–8. DOI:10.1016/j.ajo.2017.02.018
- McIntosh J, Lenting PJ, Rosales C, et al. Therapeutic levels of FVIII following a single peripheral vein administration of

- rAAV vector encoding a novel human factor VIII variant. *Blood*. 2013;121(17):3335–44. DOI:10.1182/blood-2012-10-462200
10. Epstein AL, Haag-Molkenteller C. Herpes simplex virus gene therapy for dystrophic epidermolysis bullosa (DEB). *Cell*. 2023;186(17):3523–3523. e1. DOI:10.1016/j.cell.2023.07.031
 11. Shieh PB, Kuntz NL, Dowling JJ, et al. Safety and efficacy of gene replacement therapy for X-linked myotubular myopathy (ASPIRO): A multinational, open-label, dose-escalation trial. *Lancet Neurol*. 2023;22(12):1125–39. DOI:10.1016/S1474-4422(23)00313–7
 12. Kobelt D, Pahle J, Walther W. A brief introduction to current cancer gene therapy. *Methods Mol Biol*. 2022;2521:346–58. DOI:10.1007/978-1-0716-2441-8_1
 13. Katayama S, Watanabe M, Kato Y, et al. Engineering of zinc finger nucleases through structural modeling improves genome editing efficiency in cells. *Adv Sci (Weinh)*. 2024;11(23):e2310255. DOI:10.1002/advs.202310255
 14. Stadtmayer EA, Fraietta JA, Davis MM, et al. CRISPR-engineered T cells in patients with refractory cancer. *Science*. 2020;367(6481):eaba7365. DOI:10.1126/science.aba7365
 15. George LA, Ragni MV, Rasko JEJ, et al. Long-term follow-up of the first in human intravascular delivery of AAV for gene transfer: AAV2-hFIX16 for severe hemophilia B. *Mol Ther*. 2020;28(9):2073–82. DOI:10.1016/j.ymthe.2020.06.001
 16. Smith AJ, Bainbridge JW, Ali RR. Gene supplementation therapy for recessive forms of inherited retinal dystrophies. *Gene Ther*. 2012;19(2):154–61. DOI:10.1038/gt.2011.161
 17. Mendell JR, Al-Zaidy S, Shell R, et al. Single-dose gene-replacement therapy for spinal muscular atrophy. *N Engl J Med*. 2017;377(18):1713–22. DOI:10.1056/NEJMoa1706198
 18. Wang M, Munoz J, Goy A, et al. CAR T-cell therapy in relapsed or refractory mantle-cell lymphoma. *N Engl J Med*. 2020;382(14):1331–42. DOI:10.1056/NEJMoa1914347
 19. Stepanova VM, Volkov DV, Osipova DS, et al. Targeting CD45 by gene-edited CAR T cells for leukemia eradication and hematopoietic stem cell transplantation preconditioning. *Mol Ther Oncol*. 2024;32(3):200843. DOI:10.1016/j.omton.2024.200843
 20. Cao Y, Sun H, Zhu H, et al. Allogeneic cell therapy using umbilical cord MSCs on collagen scaffolds for patients with recurrent uterine adhesion: A phase I clinical trial. *Stem Cell Res Ther*. 2018;9(1):192–9. DOI:10.1186/s13287-018-0904-3
 21. Douglas TEL, Sobczyk K, Łapa A, et al. Ca: Mg: Zn: CO₃ and Ca: Mg: CO₃-tri- and bi-elemental carbonate microparticles for novel injectable self-gelling hydrogel-microparticle composites for tissue regeneration. *Biomed Mater*. 2017;12(2):025015. DOI:10.1088/1748-605X/aa6200
 22. Gupta SK, Mishra NC, Dhasmana A. Decellularization methods for scaffold fabrication. *Methods Mol Biol*. 2018;1577:1–10. DOI:10.1007/978-1-4939-9765-1_34
 23. Lin T, Liu S, Chen S, et al. Hydrogel derived from porcine decellularized nerve tissue as a promising biomaterial for repairing peripheral nerve defects. *Acta Biomater*. 2018;73:326–38. DOI:10.1016/j.actbio.2018.04.001
 24. Gupta SK, Kumar R, Mishra NC. Influence of quercetin and nanohydroxyapatite modifications of decellularized goat-lung scaffold for bone regeneration. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2017;71:919–28. DOI:10.1016/j.msec.2016.10.085
 25. Chani B, Puri V, Sobti RC, et al. Decellularized scaffold of cryopreserved rat kidney retains its recellularization potential. *PLoS One*. 2017;12(3):e0173040. DOI:10.1371/journal.pone.0173040
 26. Song JS, Takimoto K, Jeon M, et al. Decellularized human dental pulp as a scaffold for regenerative endodontics. *J Dent Res*. 2017;96:640–6. DOI:10.1177/0022034517693606
 27. Gauvin R, Chen YC, Lee JW, et al. Microfabrication of complex porous tissue engineering scaffolds using 3D projection stereolithography. *Biomaterials*. 2012;33(15):3824–34. DOI:10.1016/j.biomaterials.2012.01.048
 28. Vidiyasheva IV, Abalymov AA, Kurochkin MA, et al. Transfer of cells with uptaken nanocomposite, magnetite-nanoparticle functionalized capsules with electromagnet tweezers. *Biomater Sci*. 2018;6(8):2219–29. DOI:10.1039/c8bm00479j
 29. Kurenov SN, Ionita C, Sammons D, Demmy TL. Three-dimensional printing to facilitate anatomic study, device development, simulation, and planning in thoracic surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2015;149(4):973–9. e1. DOI:10.1016/j.jtcvs.2014.12.059
 30. Gupta S, Goil P. Use of 3D printing and virtual 3D imaging to aid mandibular reconstruction; A low cost, easy and reproducible methodology at our centre. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2021;74(5):1101–60. DOI:10.1016/j.bjps.2020.10.078
 31. Auricchio F, Marconi S. 3D printing: clinical applications in orthopaedics and traumatology. *EFORT Open Rev*. 2017;1(5):121–7. DOI:10.1302/2058–5241.1.000012
 32. Frame M, Huntley JS. Rapid prototyping in orthopaedic surgery: A user's guide. *Sci World J*. 2012;(3):838575. DOI:10.1100/2012/838575
 33. De La Peña A, De La Peña-Brambila J, Pérez-De La Torre J, et al. Low-cost customized cranioplasty using a 3D digital printing model: A case report. *3D Print Med*. 2018;4(1):4–13. DOI:10.1186/s41205-018-0026-7
 34. Dey M, Ozbolat IT. 3D bioprinting of cells, tissues and organs. *Sci Rep*. 2020;10(1):14023. DOI:10.1038/s41598-020-70086-y
 35. Wu C, Luo M, Liu Y, et al. Application of a 3D-printed eye model for teaching direct ophthalmoscopy to undergraduates. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2022;260(7):2361–8. DOI:10.1007/s00417-021-05538-w
 36. Malecki M. 'Above all, do no harm': Safeguarding pluripotent stem cell therapy against iatrogenic tumorigenesis. *Stem Cell Res Ther*. 2014;5(3):73–9. DOI:10.1186/scr462
 37. Takahashi K, Yamanaka S. Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors. *Cell*. 2006;126(4):663–76. DOI:10.1016/j.cell.2006.07.024
 38. Menasché P, Vanneau V, Hagege A, et al. Human embryonic stem cell-derived cardiac progenitors for severe heart failure treatment: First clinical case report. *Eur Heart J*. 2015;36(30):2011–7. DOI:10.1093/eurheartj/ehv189
 39. Schwartz SD, Regillo CD, Lam BL, et al. Human embryonic stem cell-derived retinal pigment epithelium in patients with age-related macular degeneration and Stargardt's macular dystrophy: follow-up of two open-label phase 1/2 studies. *Lancet*. 2015;385(9967):509–16. DOI:10.1016/S0140-6736(14)61376-3
 40. Veres A, Faust AL, Bushnell HL, et al. Charting cellular identity during human *in vitro* β -cell differentiation. *Nature*. 2019;569(7756):368–73. DOI:10.1038/s41586-019-1168-5
 41. Korsakov IN, Samchuk DP, Pulin AA, et al. The effect of autologous gingival cells with myogenic potential on the regeneration of skeletal muscle tissue. *Genes and Cells*. 2017;12(2):71–81. (In Russ.) Корсаков И.Н., Самчук Д.П., Пулин А.А. и др. Влияние аутологичных клеток десны, обладающих миогенным потенциалом, на регенерацию скелетной мышечной ткани. *Гены и клетки*. 2017;12(2):71–81. DOI:10.23868/201707017
 42. Forest DL, Johnson LV, Clegg DO. Cellular models and therapies for age-related macular degeneration. *Dis Model Mech*. 2015;8(5):421–7. DOI:10.1242/dmm.017236
 43. Lawrence MS, Stojanov P, Polak P, et al. Mutational heterogeneity in cancer and the search for new cancer-associated genes. *Nature*. 2013;499(7457):214–8. DOI:10.1038/nature12213
 44. Piñero J, Bravo À, Queralt-Rosinach N, et al. DisGeNET: A comprehensive platform integrating information on human disease-associated genes and variants. *Nucleic Acids Res*. 2017;45(D1):D833–9. DOI:10.1093/nar/gkw943
 45. Wang Y, Chen S, Deng N, et al. Drug repositioning by kernel-based integration of molecular structure, molecular activity, and phenotype data. *PLoS One*. 2013;8(11):e78518. DOI:10.1371/journal.pone.0078518
 46. Kolosnitsyna MG, Chubarov MYu. Socio-economic factors of mortality from infectious diseases in the Russian regions. *Social Aspects of Population Health*. 2021;67(5):2. (In Russ.) Колосницына М.Г., Чубаров М.Ю. Социально-экономические факторы смертности от инфекционных заболеваний в российских регионах. *Социальные аспекты здоровья населения*. 2021;67(5):2. DOI:10.21045/2071-5021-2021-67-5-2
 47. Chan JFW, Kok KH, Zhu Z, et al. Genomic characterization of the 2019 novel human-pathogenic coronavirus isolated from a patient with atypical pneumonia after visiting Wuhan. *Emerg Microbes Infect*. 2020;9(1):221–36. DOI:10.1080/22221751.2020.1719902. Erratum in: *Emerg Microbes Infect*. 2020;9(1):540. DOI:10.1080/22221751.2020.1737364
 48. Huang H, Nguyen T, Ibrahim S, et al. DMAP: A connectivity map database to enable identification of novel drug repositioning candidates. *BMC Bioinformatics*. 2015;16(S13):S4. DOI:10.1186/1471-2105-16-S13-S4

49. Kennedy AD, Pappan KL, Donti TR, et al. Elucidation of the complex metabolic profile of cerebrospinal fluid using an untargeted biochemical profiling assay. *Mol Genet Metab.* 2017;121(2):83–90. DOI:10.1016/j.ymgme.2017.04.005

50. Lin YS, Kerr SJ, Randolph T, et al. Prediction of intravenous busulfan clearance by endogenous plasma biomarkers using global pharmacometabolomics. *Metabolomics.* 2016;12(10):161. DOI:10.1007/s11306-016-1106-6

Статья поступила в редакцию 03.02.2025; одобрена после рецензирования 13.02.2025; принята к публикации 07.05.2025. The article was submitted 03.02.2025; approved after reviewing 13.02.2025; accepted for publication 07.05.2025.

Информация об авторах:

Ирина Викторовна Видяшева — доцент кафедры фармацевтической технологии и биотехнологии, кандидат биологических наук, irinabiochemist@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0925-3093; **Марина Васильдовна Еругина** — заведующая кафедрой общественного здоровья и здравоохранения (с курсами правоведения и истории медицины), профессор, доктор медицинских наук, lab48@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8743-4500; **Анастасия Анатольевна Архангельская** — старший преподаватель кафедры фармацевтической технологии и биотехнологии, kotech@mail.ru, ORCID 0000-0002-8698-6135; **Дмитрий Владимирович Тупикин** — заведующий кафедрой фармацевтической технологии и биотехнологии, доцент, кандидат биологических наук, tupikin1@rambler.ru, ORCID 0000-0001-9730-8551; **Виктория Николаевна Стрижевская** — заместитель директора высшей школы биотехнологии пищевых систем Института общественного здоровья, здравоохранения и гуманитарных проблем медицины, доцент кафедры фармацевтической технологии и биотехнологии, доцент, кандидат технических наук, viktoriya_strizh@mail.ru, ORCID 0000-0001-9914-6576; **Максим Серафимович Марадудин** — старший научный сотрудник высшей школы биотехнологии пищевых систем Института общественного здоровья, здравоохранения и гуманитарных проблем медицины, доцент, кандидат технических наук, maradudinms@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6796-1901; **Христина Сергеевна Романова** — доцент кафедры фармацевтической технологии и биотехнологии, кандидат технических наук, rom-hcristina1@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0436-8051.

Information about the authors:

Irina V. Vidiyasheva — Assistant Professor of the Department of Pharmaceutical Technology and Biotechnology, PhD, irinabiochemist@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0925-3093; **Marina V. Erugina** — Head of the Department of Public Health and Public Health (with Courses in Law and History of Medicine), Professor, DSc, lab48@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8743-4500; **Anastasia A. Arkhangel'skaya** — Senior Lecturer of the Department of Pharmaceutical Technology and Biotechnology, kotech@mail.ru, ORCID 0000-0002-8698-6135; **Dmitriy V. Tupikin** — Head of the Department of Pharmaceutical Technology and Biotechnology, Associate Professor, PhD, tupikin1@rambler.ru, ORCID 0000-0001-9730-8551; **Viktoriya N. Strizhevskaya** — Deputy Director of the Graduate School of Biotechnology of Food Systems of the Institute of Public Health, Public Health and Humanitarian Problems of Medicine, Assistant Professor of the Department of Pharmaceutical Technology and Biotechnology, Associate Professor, PhD, viktoriya_strizh@mail.ru, ORCID 0000-0001-9914-6576; **Maksim S. Maradudin** — Senior Researcher of the Graduate School of Biotechnology of Food Systems of the Institute of Public Health, Public Health and Humanitarian Problems of Medicine, Associate Professor, PhD, maradudinms@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6796-1901; **Kristina S. Romanova** — Assistant Professor of the Department of Pharmaceutical Technology and Biotechnology, PhD, rom-hcristina1@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0436-8051.