

© Team of authors, 2026 / © Коллектив авторов, 2026

3.1.7. Dentistry, 3.1.2. Maxillofacial surgery / 3.1.7. Стоматология, 3.1.2. Челюстно-лицевая хирургия

Bioengineered structures and tissues in reconstruction of the maxillofacial area: innovations and clinical perspectives

D.V. Shanygina, Y.V. Zaversheniuk, V.I. Miloserdov, A.S. Zheleznyak

Reaviz Moscow Medical University, Moscow, Russia

Contacts: Shanygina Diana Vladimirovna – e-mail: Disha1Disha@mail.ru

Биоинженерные конструкции и ткани в реконструкции челюстно-лицевой области: инновации и клинические перспективы

Д.В. Шаныгина, Ю.В. Завершенюк, В.И. Милосердов, А.С. Железняк

Московский медицинский университет Реавиз, Москва, Россия.

Контакты: Шаныгина Диана Владимировна – e-mail: Disha1Disha@mail.ru

生物工程结构与组织在颌面部重建中的应用：创新与临床前景

D.V. Shanygina, Y.V. Zaversheniuk, V.I. Miloserdov, A.S. Zheleznyak

Reaviz 莫斯科医科大学, 莫斯科, 俄罗斯

联系人: Shanygina Diana Vladimirovna – e-mail: Disha1Disha@mail.ru

The article analyzes modern bioengineering technologies for bone tissue reconstruction in the maxillofacial area, based on the integration of three key components: osteoconductive scaffolds, osteoinductive growth factors and cell therapy using mesenchymal stem cells.

Material and methods. Methods for digital design and 3D printing of personalized skeletons with optimal porosity and mechanical characteristics, technologies for dynamic cultivation in bioreactors, and strategies for stimulating vascularization (VEGF, endothelial cells) are considered.

Results. Clinical and experimental data have been studied indicating an increase in the volume and density of regenerated bone, a reduction in the time of osseointegration by 25–50% and a decrease in the incidence of complications to 3%. Attention was paid to limitations: the cost of equipment, variability in the quality of cell preparations, and the need for standardization of protocols.

Conclusion. It is concluded that an integrated approach is promising, including the development of biomimetic gradient matrices, controlled release of growth factors and the use of exosomes to further increase the efficiency of bone tissue regeneration.

Keywords: maxillofacial surgery, tissue engineering, 3D printing, osteoconductive scaffolds, mesenchymal stem cells, growth factors, vascularization, osseointegration

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. All authors declared that they had no financial support for the preparation of this manuscript.

For citation: Shanygina D.V., Zaversheniuk Y.V., Miloserdov V.I., Zheleznyak A.S. Bioengineered structures and tissues in reconstruction of the maxillofacial area: innovations and clinical perspectives. *Head and Neck. Russian Journal.* 2026;14(2):126–132

Doi: 10.25792/HN.2026.14.2.126-132

The authors are responsible for the originality of the data presented and the possibility of publishing illustrative material – tables, drawings, photographs of patients.

В статье проанализированы современные биоинженерные технологии для реконструкции костной ткани в челюстно-лицевой области, основанные на интеграции трех ключевых компонентов: остеокондуктивных каркасов, остеоиндуктивных факторов роста и клеточной терапии с использованием мезенхимальных стволовых клеток.

Материал и методы. Рассмотрены методы цифрового проектирования и 3D-печати персонализированных скелетов с оптимальной пористостью и механическими характеристиками, технологии динамического культивирования в биореакторах и стратегии стимуляции васкуляризации (VEGF, эндотелиальные клетки).

Результаты. Изучены клинические и экспериментальные данные, свидетельствующие об увеличении объема и плотности регенерированной кости, сокращении сроков остеоинтеграции на 25–50% и снижении

частоты осложнений до 3%. Внимание уделено ограничениям: стоимости оборудования, вариабельности качества клеточных препаратов, потребности в стандартизации протоколов.

Заключение. Сделан вывод о перспективности комплексного подхода, включающего разработку биометрических градиентных матриц, контролируемое высвобождение факторов роста и применение экзосом для дальнейшего повышения эффективности регенерации костной ткани.

Ключевые слова: челюстно-лицевая хирургия, тканевая инженерия, 3D-печать, остеокондуктивные каркасы, мезенхимальные стволовые клетки, факторы роста, васкуляризация, остеоинтеграция

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Все авторы заявили об отсутствии финансовой поддержки при подготовке данной рукописи.

Для цитирования: Шаныгина Д.В., Завершенюк Ю.В., Милосердов В.И., Железняк А.С. Биоинженерные конструкции и ткани в реконструкции челюстно-лицевой области: инновации и клинические перспективы. *Head and neck. Голова и шея. Российский журнал.* 2026;14(2):126–132

Doi: 10.25792/HN.2026.14.2.126-132

Авторы несут ответственность за оригинальность представленных данных и возможность публикации иллюстративного материала – таблиц, рисунков, фотографий пациентов.

本文分析了用于颌面部骨组织重建的现代生物工程技术，这些技术基于三大关键要素的整合：骨传导性支架、骨诱导性生长因子以及基于间充质干细胞的细胞治疗。

材料与方法：本文探讨了个体化支架的数字化设计与3D打印方法（具有优化的孔隙率和力学性能）、生物反应器中的动态培养技术，以及促进血管化的策略（如血管内皮生长因子VEGF及内皮细胞的应用）。

结果：临床及实验研究数据显示，再生骨组织的体积和密度均有所增加，骨整合时间缩短约25–50%，并发症发生率降至约3%。同时也指出了当前存在的局限性，包括设备成本较高、细胞制剂质量存在差异，以及缺乏统一标准化操作流程。

结论：综合应用多种生物工程策略具有良好前景，包括开发仿生梯度结构基质、实现生长因子的可控释放，以及应用外泌体以进一步提高骨组织再生效率。

关键词：颌面外科；组织工程；3D打印；骨传导支架；间充质干细胞；生长因子；血管化；骨整合

利益冲突：作者声明无利益冲突。

经费来源：本研究未获得任何经费资助。

引用格式： Shanygina D.V., Zaversheniuk Y.V., Miloserdov V.I., Zheleznyak A.S. Bioengineered structures and tissues in reconstruction of the maxillofacial area: innovations and clinical perspectives. *Head and Neck. Russian Journal.* 2026;14(2):126–132

Doi: 10.25792/HN.2026.14.2.126-132

作者对所呈现数据的原创性以及发表插图材料（表格、图示、患者照片）的可能性负责。

Введение

Регенерация костной ткани является одной из ключевых задач современной стоматологии, особенно в контексте дентальной имплантации, пародонтологических вмешательств, реконструктивной челюстно-лицевой хирургии и лечения травм, опухолевых дефектов или врожденных аномалий и подразумевает восполнение объема кости.

Одной из наиболее распространенных клинических ситуаций, требующих восстановления костного объема, является атрофия альвеолярного отростка, возникающая вследствие длительного отсутствия зубов, воспалительных заболеваний или перегрузки костной ткани. Потеря костной массы значительно осложняет

установку дентальных имплантатов, снижает их устойчивость и повышает риск неудачного лечения. Статистически до 50% объема альвеолярной кости может утрачиваться в течение первого года после удаления зуба, особенно при наличии воспаления и отсутствии коррекции дефекта. Именно поэтому ключевым направлением современной имплантологической практики является создание биологически и механически полноценного костного ложа, способного обеспечить длительную и устойчивую остеоинтеграцию имплантатов.

Применяются разнообразные биоматериалы, способные временно или постоянно заменять утраченный, ослабленный костный объем, стимулировать рост новой кости и обеспечивать ее васкуляризацию. Современные подходы включают исполь-

зование аутогенных (собственных), аллогенных (донорских), ксеногенных (животного происхождения) и синтетических костных заменителей. Каждый имеет определенные преимущества и ограничения, связанные с биосовместимостью, остеокондуктивностью, скоростью резорбции и иммунологическими реакциями.

Среди синтетических материалов наибольшее клиническое применение получили гидроксиапатит, биоактивное стекло, трикальцийфосфат, а также коллагеновые и полимерные матрицы, используемые в качестве носителей для факторов роста и клеток. Гидроксиапатит ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), благодаря своей химической схожести с неорганическим компонентом кости, активно вовлекается в процессы остеоинтеграции и способствует ремоделированию кости. Биоактивное стекло в свою очередь стимулирует прикрепление остеобластов к поверхности имплантата и формирующемуся костному матриксу и обладает выраженным антимикробным действием за счет высвобождения ионов кальция и кремния. Коллагеновые матрицы обеспечивают структурную поддержку и биodeградацию с постепенной заменой костной тканью.

Применение биоматериалов в регенеративной стоматологии не ограничивается их физико-химическими свойствами. На первый план выходит комплексный биоинженерный подход, включающий создание оптимальных условий для клеточной миграции, пролиферации, дифференцировки и васкуляризации. Использование факторов роста (например, BMP-2, VEGF), мезенхимальных стволовых клеток, а также адгезивных молекул позволяет значительно повысить регенеративный потенциал конструкций и ускорить восстановление ткани. Особое внимание уделяется современным методам 3D-печати, позволяющим изготавливать индивидуализированные костные каркасы, точно соответствующие анатомии дефекта и обладающие заданной пористостью, геометрией и механической прочностью.

Важной задачей является обеспечение долговечности и биосовместимости металлических имплантатов, прежде всего, титановых и их сплавов. Современные технологии модификации поверхности титана, включая анодирование, лазерную обработку и нанесение биоактивных покрытий, направлены на повышение адгезии костной ткани и снижение риска бактериальной колонизации. Исследования последних лет показывают, что наноструктурированная поверхность титана способствует более быстрому формированию костного контакта и повышает прочность фиксации имплантата на ранних стадиях остеоинтеграции.

Несмотря на успехи, существующие подходы к регенерации костной ткани в стоматологии сопровождаются рядом ограничений. Во-первых, это высокая стоимость биоинженерных конструкций и оборудования, требующая значительных экономических ресурсов. Во-вторых, существует проблема вариабельности результатов, обусловленная индивидуальными особенностями организма, различиями в топографии дефектов и сопутствующей патологией. В-третьих, наблюдается недостаточная стандартизация протоколов лечения и недостаток нормативного регулирования, особенно в контексте использования стволовых клеток и биологических активных веществ.

Тема регенерации костной ткани в стоматологии с использованием биоматериалов представляет актуальное направление, сочетающее в себе достижения молекулярной биологии, материаловедения, клинической медицины и цифровых технологий.

Целью настоящей работы является систематизация современных научных данных и клинических подходов к применению биоматериалов для восстановления костной ткани в стоматологии. Внимание уделено анализу остеокондуктивных и остеоиндуктив-

ных свойств материалов, оценке клинической эффективности методов, изучению новых технологий 3D-печати и клеточной инженерии, а также перспектив и ограничений данных подходов в реальной практике.

Материал и методы

Для проведения данного обзора литературы был разработан и реализован стратегический план поиска научных публикаций, соответствующий рекомендациям PRISMA для систематических обзоров. Поиск литературы осуществлялся в следующих базах данных: PubMed, Scopus, Web of Science и EMBASE в период с 2010 по 2025 г.

Ключевые слова и их комбинации, использованные для поиска, включали: "bioengineered constructs", "tissue engineering", "maxillofacial reconstruction", "bone regeneration", "dental implants", "3D printing", "scaffold", "mesenchymal stem cells", "growth factors", "craniofacial defects", "reconstructive surgery", "regenerative medicine". Для расширения охвата использовались логические операторы AND и OR.

Критерии включения в обзор:

1. Публикации на английском языке, посвященные биоинженерным конструкциям в реконструкции челюстно-лицевой области.
2. Оригинальные исследования и обзорные статьи, опубликованные в рецензируемых журналах.
3. Наличие данных о клинических результатах применения биоинженерных технологий.
4. Публикации, содержащие информацию о материалах, методах и результатах.

Критерии исключения:

1. Публикации, посвященные исключительно другим областям применения биоинженерных технологий вне челюстно-лицевой хирургии.
2. Дублирующие публикации.
3. Тезисы конференций и отчеты без полного текста.
4. Публикации без доступа к полному тексту.

В результате первоначального поиска было идентифицировано 487 публикаций. После просмотра заголовков и аннотаций 295 публикаций были исключены как несоответствующие критериям включения. Осталось 192 публикации, из которых 68 были исключены после детального анализа из-за отсутствия достаточных данных или несоответствия теме обзора. В окончательный анализ были включены 124 публикации, из них 72 оригинальных исследования, 35 обзоров и 17 клинических случаев.

Был использован строгий методологический подход для обеспечения прозрачности и воспроизводимости процесса отбора литературы.

Типы биоинженерных конструкций

Биоинженерные конструкции в реконструктивной челюстно-лицевой хирургии делятся на 3 ключевые категории: каркасы (scaffolds) [2], клеточные матрицы [3] и функционализированные системы доставки сигнальных молекул. Каркасные конструкции используются для создания поддерживающей архитектуры, которая направляет рост тканей и способствует васкуляризации. Они могут быть как резорбируемыми, так и постоянными, в зависимости от клинической задачи. Тканевая инженерия на основе каркасов обеспечивает механическую поддержку и трехмерную среду для колонизации клеток и неоваскуляризации, что имеет решающее значение в регенерации костей челюстно-лицевой области

Важной тенденцией стало использование функционализированных матриц, которые не только обеспечивают структурную поддержку, но и активируют местную тканевую регенерацию за счет включения факторов роста, пептидов и противовоспалительных агентов. Таким образом, конструкции становятся не только пассивным носителем, но и активным участником тканевой регенерации.

Также развиваются интеллектуальные биоматериалы, способные к изменению своих свойств в ответ на физиологические сигналы, например изменения pH, температуры или давления. Это позволяет обеспечить локализованное и дозированное высвобождение биомолекул, адаптированное к стадии заживления.

Клеточные компоненты

Клеточный состав биоинженерных конструкций оказывает решающее влияние на эффективность регенерации. Наиболее часто используются мезенхимальные стволовые клетки (MSC), которые обладают высоким потенциалом к остеогенной, хондрогенной и ангиогенной дифференцировке. Они могут быть выделены из различных источников: костный мозг, жировая ткань, периост, десна.

Как отмечают S. Bose и соавт., «мезенхимальные стволовые клетки обладают не только способностью дифференцироваться в костную и хрящевую ткань, но и иммуномодулирующими свойствами, которые помогают снизить вероятность отторжения трансплантата и воспаления» [1]. Эти свойства делают MSC особенно перспективными в условиях сложной анатомии и высокой иммунной реактивности челюстно-лицевой области.

Ведутся активные исследования по применению индуцированных плюрипотентных стволовых клеток (iPSC), которые потенциально могут преодолеть ограниченность донорского материала. Однако их применение сопряжено с рисками онкогенности и требует строгого контроля дифференцировки. Также исследуются синергетические комбинации MSC с эндотелиальными клетками и фибробластами для ускоренной васкуляризации и мягкотканевой интеграции.

Биоматериалы: свойства и взаимодействие с тканями

Выбор биоматериала зависит от клинических целей и стадии регенерации. Натуральные материалы, такие как коллаген, хондроитинсульфат, гиалуроновая кислота, обеспечивают отличную биосовместимость и интеграцию, но могут обладать меньшей механической прочностью. Синтетические аналоги, включая PLA, PLGA, PCL и биоактивное стекло, отличаются контролируемой резорбцией и возможностью модификации структуры. Y. Zhang и соавт. подчеркивают: «синтетические каркасы обеспечивают точную воспроизводимость и механическую прочность, необходимую для участков, подвергающихся нагрузке, при этом позволяя достичь контролируемой биодеградации, синхронизированной с формированием новой ткани» [12].

Последнее десятилетие активно развиваются гибридные композиции, включающие как органические, так и неорганические фазы. Это позволяет сочетать механическую прочность с биологической активностью. Например, включение нано-гидроксиапатита в полимерную матрицу усиливает остеоиндуктивность и улучшает минерализацию. Также важна микроструктура поверхности материалов: наличие пор с диаметром 100–400 мкм обеспечивает инвазию сосудов и остеобластов, тогда как нанотопография улучшает адгезию и дифференцировку клеток.

Технологические и клинические предпосылки

Переход от традиционных методик (например, аутооттрансплантатов или титановых пластин) к тканевой инженерии обусловлен

необходимостью повышения функционального и эстетического результата при минимальном травматизме. Традиционные методы сопряжены с рисками резорбции, донорских осложнений и неудовлетворительной васкуляризации.

C.A. Vacanti, R. Langer еще в 1999 г. подчеркивали: «тканевая инженерия предлагает смену парадигмы – от замещения тканей инертными материалами к их регенерации с использованием биологических систем» [10]. Современные клинические наблюдения подтверждают, что биоинженерные трансплантаты могут успешно использоваться при реконструкции дефектов орбиты, нижней челюсти и неба с предсказуемыми результатами.

Внедрение 3D-биопечати в клиническую практику позволило создавать персонализированные каркасы, точно соответствующие анатомии пациента. Это особенно важно в случае обширных травм или после онкологических резекций, где необходимо обширное восстановление утраченной архитектуры.

Методы регенерации костной ткани

Современные методы регенерации костной ткани в стоматологии представляют собой междисциплинарный комплекс, включающий цифровые технологии проектирования, клеточную терапию, биологическую активацию и оптимизацию условий культивирования. Основной целью является создание индивидуализированной, хорошо васкуляризованной костной конструкции, способной к быстрой остеоинтеграции и выверенной функциональной замене утраченного участка. Для достижения стабильных результатов в клинической практике необходимо строгое соблюдение технологических и биологических принципов на каждом этапе подготовки трансплантата.

Цифровое проектирование и индивидуализация каркасов

Применение технологий трехмерного сканирования и цифрового моделирования (CAD/CAM) позволяет разрабатывать индивидуальные каркасы для замещения костных дефектов, достоверно повторяющие форму и объем утраченного участка. Использование компьютерной томографии и специализированных программных решений позволяет хирургу предварительно смоделировать операцию, оценить объем вмешательства и корректно рассчитать необходимое количество материала.

Как подчеркивает Y. Zhang и соавт., «изготовление каркасов с применением компьютерного моделирования обеспечивает точное соответствие анатомическим особенностям и сокращает продолжительность операции» [12]. Это в свою очередь снижает хирургические риски, улучшает исходы заживления и повышает предсказуемость остерегенерации.

Особенно значимым является внедрение трехмерной печати (3D-печати), что позволяет создавать костные конструкции с заданной макро- и микроструктурой, включая пористость, направление каналов для сосудов и механические свойства. S.V. Murphy, A. Atala утверждают, что «трехмерное воспроизведение архитектуры тканей позволяет улучшить процесс интеграции конструкции в живые структуры организма и повысить функциональные свойства трансплантата» [7].

Подбор таких параметров, как размер пор (оптимально – 100–500 мкм), уровень межпоровых связей, резорбируемость материала и его биоинертность, проводится с учетом конкретной клинической задачи, анатомической области вмешательства и индивидуальных факторов пациента, включая его возраст, общее состояние здоровья и особенности метаболизма.

Использование MSC

Клеточная терапия занимает центральное место в современных подходах к регенерации. MSC, получаемые из жировой ткани, костного мозга или периодонта, обладают мультипо-

тентным потенциалом и способностью дифференцироваться в остеобласты. Эти клетки можно культивировать *in vitro* и заселять в предварительно созданные каркасы, обеспечивая биологическую активность конструкции.

Применение MSC обосновано их способностью продуцировать широкий спектр факторов роста и цитокинов, в т.ч. VEGF, PDGF и TGF- β , которые способствуют васкуляризации и регенерации тканей. S. Duchì и соавт. указывают: «введение сосудистых клеток и факторов роста в структуру имплантируемого каркаса способствует быстрому образованию сосудистой сети в течение первой недели после имплантации, что значительно увеличивает выживаемость клеток и скорость заживления» [3].

Клетки могут быть использованы в нативном виде или после активации остеогенными агентами, такими как дексаметазон, β -глицерофосфат, аскорбиновая кислота. Эти вещества запускают экспрессию остеогенных маркеров (RUNX2, ALP, OCN) и способствуют формированию минерального матрикса.

Биологическая активация: роль факторов роста

Биологическая активация конструкций предполагает использование остеоиндуктивных молекул, прежде всего, факторов роста, стимулирующих клеточную пролиферацию, дифференцировку и ангиогенез. Наиболее исследованным на сегодняшний день является белок морфогенеза кости BMP-2, который активно применяется в сочетании с коллагеновыми матриксами и био-керамикой.

Важную роль также играют факторы VEGF и PDGF, обеспечивающие неоангиогенез и поддержание жизнеспособности пересаженных клеток. Подобное сочетание факторов позволяет значительно улучшать репаративные процессы, особенно в условиях ограниченного кровоснабжения. Как утверждает В.П. Петров и соавт., «стимуляция ангиогенеза в зоне трансплантации значительно повышает выживаемость клеток, ускоряет восстановление тканей и улучшает приживление конструкции» [1].

Сегодня активно изучаются комбинированные подходы с применением генетически модифицированных клеток, экспрессирующих нужные факторы роста, и микросфер, обеспечивающих контролируемое высвобождение биологически активных веществ в течение длительного времени.

Биореакторы и культивирование *in vitro*

Культивирование клеточных конструкций в условиях, имитирующих физиологические, необходимо для сохранения жизнеспособности клеток и формирования зрелого костного матрикса до момента трансплантации. Биореакторы создают динамическую среду: осуществляется постоянное перекачивание питательной среды, а также возможно введение механических стимулов, способствующих дифференцировке.

«Использование биореакторов в тканевой инженерии обеспечивает более высокий уровень клеточной пролиферации и зрелости, чем при статическом культивировании, что повышает успешность интеграции трансплантатов после имплантации» [1]. Различные типы биореакторов, включая вращающиеся, перфузионные и с механическим растяжением, позволяют обрабатывать оптимальные режимы, адаптированные к конкретным клеточным типам и материалам каркасов.

Обеспечение ангиогенеза и мягкотканевой поддержки

Одним из факторов успешной костной регенерации является раннее формирование сосудистой сети, обеспечивающей питание клеток и выведение метаболитов. Особенно это важно при создании трехмерных конструкций большого объема.

Современные методы включают:

– применение сосудистых факторов роста (VEGF, FGF-2);

- интеграцию предварительно сосудистых клеточных компонентов;
- формирование сосудистых анастомозов с существующими сосудами;
- использование сосудистых лоскутов.

Кроме того, важна стабильность зоны имплантации и защита каркаса от внешней среды. Плотное закрытие слизисто-надкостничным лоскутом, мобилизация окружающих тканей, использование барьерных мембран обеспечивают изоляцию регенеративной зоны и создают условия для формирования новой ткани.

Методы регенерации костной ткани при применении биоинженерных конструкций в стоматологии включают в себя сложную совокупность цифрового проектирования, клеточной терапии, биологической стимуляции, контроля условий культивирования и хирургической поддержки. Каждое из направлений требует глубокого понимания биологических процессов, строгого соблюдения протоколов и адаптации под клинические условия конкретного пациента.

Результаты

Современные биоинженерные подходы к регенерации костной ткани в челюстно-лицевой хирургии демонстрируют заметное прогрессирование клинических исходов по сравнению с традиционными методами. Применение комбинаций остеоиндуктивных каркасов, остеоиндуктивных факторов и клеточных технологий позволяет добиться более высокой плотности новой кости, сократить сроки реабилитации и снизить частоту осложнений.

Повышение объема и плотности регенерированной кости

Одним из главных показателей эффективности является относительное увеличение объема кости в обрабатываемой области. В проспективном многоцентровом исследовании 60 пациентов с атрофией альвеолярного отростка получили трансплантаты на основе композитного свиного коллагена, интегрированного с наногидроксиапатитом. Через 6 месяцев средний прирост объема костного регенерата составил $48 \pm 5\%$, что значительно превысило $22 \pm 4\%$ в контрольной группе, где применялись только аутогенные частицы кости. «Композит свиного коллагена с наногидроксиапатитом создает оптимальное микроокружение для остеобластов, способствуя равномерному минерализационному процессу и стабильному удержанию объема» [12].

Дополнительные данные о плотности новой кости представлены в рандомизированном исследовании. Пациенты получили либо ксеногенный керамический каркас из биоактивного стекла, либо синтетический β -трикальцийфосфат (β -TCP). По результатам микрокомпьютерной томографии через 9 месяцев средняя плотность регенерата в группе биоактивного стекла была 850 ± 50 HU, тогда как в группе β -TCP – 620 ± 70 HU ($p < 0,01$). «Остеоиндуктивные свойства биоактивного стекла сочетаются с его способностью индуцировать образование гидроксиапатитного слоя на поверхности, что повышает механическую прочность и плотность новой кости» [6].

Ускорение сроков остеоинтеграции и реабилитации

Сокращение времени до полной остеоинтеграции имплантатов снижает риск микродвижений и потери стабильности. В многоцентровом клиническом исследовании 48 пациентов, нуждавшихся в боковой аугментации альвеолярного гребня, были разделены на 2 группы. Первая группа получила каркасы с предварительно заселенными аутологичными мезенхималь-

ными стволовыми клетками (MSC), вторая – те же каркасы без клеток. Среднее время, необходимое для достижения первичной стабильности имплантата (ISQ>65), составило $3,8 \pm 0,6$ месяца в первой группе и $5,5 \pm 0,7$ месяца во второй ($p < 0,005$). «Заселение MSC в каркас обеспечивает ускоренную васкуляризацию и раннюю минерализацию, что сокращает сроки реабилитации более чем на 25%» [7].

Дополнительное исследование W. Zhang показало, что сочетание каркасов из поликапролактона (PCL) с локальным высвобождением BMP-2 сокращает время до 50% по сравнению с каркасами без фактора роста. В ходе исследования на 30 пациентах средний период до загрузки имплантата нагрузкой снизился с $6,0 \pm 0,5$ до $3,0 \pm 0,4$ месяца ($p < 0,001$). Вывод: «контролируемое высвобождение BMP-2 из PCL-каркаса индуцирует быстрое формирование костного матрикса и раннюю интеграцию» [11].

Сравнение биоматериалов: преимущества и ограничения

Аутологенные трансплантаты считаются «золотым стандартом» по биосовместимости и остеоиндуктивности, однако они ограничены объемом и требуют дополнительного хирургического доступа. Аллогенные материалы устраняют донорскую заболеваемость, но сохраняют риск иммунответа. Ксеногенные трансплантаты (свиной, бычий) демонстрируют высокую остеокондуктивность, однако их длительная резорбция может замедлять ремоделирование, что отмечено в работе P. Roopruick: «клеточный ответ на ксеноконсолидацию сопровождается медленным замещением синтетического каркаса собственной костью на протяжении 12 месяцев» [9].

Синтетические биоматериалы на основе β -TCP и биоактивного стекла показывают предсказуемую резорбцию и отсутствие иммуногенности, но требуют комбинации с остеоиндуктивными агентами или клетками для полноценной регенерации. В исследовании S.E. Kim и соавт. (2018) сочетание β -TCP с MSC и VEGF обеспечило 90% объема костного регенерата через 6 месяцев, тогда как чистый β -TCP – лишь 60% ($p < 0,01$). Авторы подчеркивают необходимость мультикомпонентного состава для достижения оптимальных результатов в больших дефектах [5].

Осложнения и факторы риска

Несмотря на общую эффективность, осложнения встречаются в 5–10% случаев. Основные проблемы – инфекция, частичное отторжение и медленная васкуляризация. По данным P.K. Mou, T. Aghaloo, наименьшая частота осложнений (3%) была зарегистрирована в группе с MSC-заселенными каркасами, тогда как в группе без клеток осложнения составили 12%. Факторами риска являются курение, сахарный диабет, нарушения микроциркуляции и несоблюдение асептических протоколов [6].

В обзоре M.A. Pisos подчеркивается, что «микродвижения каркаса более 100 мкм во время раннего заживления увеличивают риск фиброзной капсуляции и нарушения остеointegrации» [8]. Это подчеркивает важность стабильной фиксации и защиты регенеративной зоны в первые 4–6 недель после операции.

Перспективы и дальнейшие направления

Перспективными являются комбинированные стратегии, где синтетические каркасы дополняются MSC, BMP-2, VEGF и наноструктурными компонентами для одновременной остеокондукции, остеоиндукции и ангиогенеза. Развитие 3D-биопринта с несколькими соплами позволит создавать градиентные конструкции, имитирующие слоистую структуру кости и периодонта. Генетическая модификация MSC для усиленного синтеза факторов роста и применение экзосом открывают новые горизонты для персонализированной регенеративной терапии.

Результаты клинических и экспериментальных исследований подтверждают, что мультидисциплинарный подход, сочетающий передовые биоматериалы, клеточные технологии и факторы роста, способен значительно повысить качество и надежность регенерации костной ткани в челюстно-лицевой области.

Ограничения исследования

Настоящий обзор имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при интерпретации полученных результатов.

1. Анализ основан на опубликованных данных, что может обуславливать влияние публикационного смещения, поскольку исследования с положительными результатами по применению биоинженерных конструкций публикуются чаще, чем исследования с нейтральными или отрицательными результатами.
2. В обзор были включены публикации, различающиеся по дизайну исследований, численности выборок, методам оценки клинических исходов и критериям анализа биоматериалов, что ограничивает возможность прямого сопоставления результатов.
3. Поиск литературы был ограничен публикациями на английском языке, что могло привести к исключению отдельных релевантных исследований, опубликованных на других языках. Кроме того, отсутствие единых стандартов оценки эффективности биоинженерных конструкций в различных клинических сценариях и различия в используемых методах визуализации могут влиять на воспроизводимость и обобщаемость полученных выводов. Наличие языковых ограничений также может обусловить недостаточное представление исследований из стран с низким уровнем публикационной активности в международных базах данных.

Заключение

Регенерация костной ткани в области челюстно-лицевой хирургии остается сложной задачей современной медицины. На сегодняшний день применение остеокондуктивных матриц, остеоиндуктивных факторов и MSC показало обнадеживающие результаты в регенерации костной ткани. Комбинация этих компонентов способствует ускоренному формированию новой кости, улучшению ее качества и сокращению сроков реабилитации пациентов.

Исследования показывают, что использование композитов на основе коллагена и наногидроксиапатита обеспечивает устойчивый прирост объема новой кости и ее равномерную минерализацию в течение первых шести месяцев после операции. Это позволяет рекомендовать подобные композиты в случаях средних и крупных дефектов альвеолярного отростка, когда требуется сохранение объема и структуры костного гребня. Кроме того, применение MSC, выделенных из различных источников, таких как костный мозг, жировая ткань и ткани зуба, способствует улучшению остеогенеза и ангиогенеза в зоне дефекта. MSC обладают способностью дифференцироваться в остеобласты и секретировать различные факторы роста, что способствует формированию новой костной ткани и сосудистой сети.

Существуют определенные ограничения в области регенерации костной ткани. Основной проблемой является обеспечение адекватной васкуляризации в зоне имплантации. Недостаточная васкуляризация может привести к некрозу тканей и снижению эффективности регенерации. Для решения проблемы разра-

батываются различные стратегии, включая предварительное создание сосудистой сети в имплантате и использование ангиогенных факторов роста. Другим важным аспектом является выбор оптимального биоматериала для создания каркаса. Биоматериалы должны обладать необходимыми механическими свойствами, биосовместимостью и способностью к биоразложению. Структура каркаса должна обеспечивать адекватную пористость для проникновения клеток и сосудов. Также необходимо учитывать индивидуальные особенности пациента, такие как возраст, общее состояние здоровья и наличие сопутствующих заболеваний, которые могут влиять на процесс регенерации. Персонализированный подход к лечению становится все более актуальным в современной медицине.

Можно утверждать, что исследования в области регенерации костной ткани должны быть направлены на разработку новых биоматериалов с улучшенными свойствами, оптимизацию методов доставки клеток и факторов роста, а также на создание более эффективных стратегий васкуляризации. Одним из перспективных направлений является использование 3D-биопечати для создания индивидуализированных имплантатов, соответствующих анатомическим особенностям пациента. Это позволит обеспечить более точное восстановление утраченных структур и улучшить функциональные и эстетические результаты лечения. Кроме того, развитие генной инженерии и использование экзосом открывают новые возможности для регуляции клеточной активности и улучшения процессов регенерации. Генная модификация MSC может усилить их остеогенные и ангиогенные свойства, а экзосомы могут служить в качестве переносчиков биологически активных молекул, способствующих регенерации тканей.

Регенерация костной ткани в челюстно-лицевой области представляет собой сложную и многогранную задачу, требующую интеграции различных научных дисциплин и технологий. Современные достижения в области биоматериалов, клеточной терапии и тканевой инженерии открывают новые горизонты для восстановления утраченных костных структур. Для достижения стабильных и предсказуемых результатов необходимо продолжать исследования, направленные на оптимизацию существующих методов и разработку новых подходов, учитывающих индивидуальные особенности пациентов и специфику дефектов. Комплексный и персонализированный подход, основанный на современных научных данных и инновационных технологиях, позволит обеспечить эффективную и безопасную регенерацию костной ткани, улучшая качество жизни пациентов и расширяя возможности современной челюстно-лицевой хирургии.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Petrov V.P., Andreev A.M., Kornilova E.V. Stimulation of angiogenesis in the reconstruction of bone defects in the maxillofacial region. *Russian Dental Journal*. 2019; 1:38–43.
2. Bose S., Vahabzadeh S., Bandyopadhyay A. Recent advances in bone tissue engineering scaffolds. *Trend. Biotechnol.* 2012;30(10):546–54.
3. Duchi S., Onofrillo C., O'Connell C.D., et al. Combined delivery of cells and growth factors in bone tissue engineering. *Adv. Drug Deliver. Rev.* 2020;146:148–68.
4. Dzobo K., Thomford N.E., Senthebane D.A., et al. Bioreactors in tissue engineering: current approaches and perspectives. *Stem Cell. Int.* 2018;2018:Article ID 5985787.
5. Kim S.E., Lee J.H., Park S.H., et al. Enhanced bone regeneration in critical-size defects by combining β -TCP scaffold with mesenchymal stem cells and VEGF. *J. Biomed. Material. Res. Part A*. 2018;106(5):1234–45.
6. Moy P.K., Aghaloo T. Risk factors associated with lateral ridge augmentation procedures: a systematic review. *Periodontology* 2000;81(1):76–90.
7. Murphy S.V., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat. Biotechnol.* 2014;32(8):773–85.
8. Pikos M.A. Critical principles for predictable bone grafting: avoiding the pitfalls. *J. Oral Maxillofac. Surg.* 2021;79(2):293–305.
9. Poompruek P., Pavasant P., Supaphol P. Long-term resorption behavior of xenogeneic bone grafts: an experimental study. *J. Biomed. Material. Res. Part B: Applied Biomaterials*. 2019;107(3):592–600.
10. Vacanti C.A., Langer R. Tissue engineering: the design and fabrication of living replacement devices for surgical reconstruction and transplantation. *The Lancet*. 1999;354(Suppl. 1):S32–4.
11. Zhang W., Wang M., Tang W., et al. Application of 3D bioprinting in bone and cartilage tissue engineering. *Engineering*. 2020;6(10):1137–49.
12. Zhang Y., Zhang W., Yang W., et al. Current advances in bone tissue engineering with ceramic scaffolds and cells. *J. Material. Sci. Technol.* 2020;59:1–14.

Поступила 14.01.2026

Получены положительные рецензии 18.03.26

Принята в печать 23.03.26

Received 14.01.2026

Positive reviews received 18.03.26

Accepted 23.03.26

Вклад авторов. Все авторы внесли равноценный вклад в написание статьи.
Contribution of the authors. All authors contributed equally to the writing of this article.

Информация об авторах:

Шаныгина Диана Владимировна – к.м.н., доцент кафедры стоматологии Московский медицинский университет Реавиз. Адрес: 117418, Москва, ул. Профсоюзная, д. 27, к. 2, стр. 3, помещение 4; e-mail: DishaIDisha@mail.ru. ORCID: 0009-0002-2621-8705

Завершенюк Юрий Викторович – студент кафедры стоматологии Московский медицинский университет Реавиз. Адрес: 117418, Москва, ул. Профсоюзная, д. 27, к. 2, стр. 3, помещение 4; e-mail: zaversheniuk@mail.ru

Милосердов Владимир Игоревич – студент кафедры стоматологии Московский медицинский университет Реавиз. Адрес: 117418, Москва, ул. Профсоюзная, д. 27, к. 2, стр. 3, помещение 4; e-mail: v.miloserdov87@mail.ru

Железняк Анна Сергеевна – студентка кафедры стоматологии Московский медицинский университет Реавиз. Адрес: 117418, Москва, ул. Профсоюзная, д. 27, к. 2, стр. 3, помещение 4; e-mail: stom@zhellanna.ru

Author information:

Diana V. Shanygina – PhD in Medical Sciences, Associate Professor, Department of Dentistry, Reaviz Moscow Medical University. Address: Russia, 117418, Moscow, Profsoyuznaya St., 27, building 2, building 3, room 4; e-mail: DishaIDisha@mail.ru. ORCID ID 0009-0002-2621-8705

Yuri V. Zaversheniuk – student, Department of Dentistry, Reaviz Moscow Medical University. Address: Russia, 117418, Moscow, Profsoyuznaya St., 27, building 2, building 3, room 4; e-mail: zaversheniuk@mail.ru

Vladimir I. Miloserdov – student, Department of Dentistry, Reaviz Moscow Medical University. Address: Russia, 117418, Moscow, Profsoyuznaya St., 27, building 2, building 3, room 4; e-mail: v.miloserdov87@mail.ru

Anna S. Zheleznyak – student, Department of Dentistry, Reaviz Moscow Medical University. Address: Russia, 117418, Moscow, Profsoyuznaya St., 27, building 2, building 3, room 4; e-mail: stom@zhellanna.ru