

Перспективы применения скаффолдов на основе полилактида в стоматологии. Обзор литературы

А.А. Долгалев¹, А.А.Таран¹, А.К. Зеленский¹, Н.Р. Раджабов²

¹ ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный медицинский университет», Министерства здравоохранения РФ, Ставрополь, Россия

² ФГКУ «412 военный госпиталь Министерства обороны Российской Федерации», Владикавказ, Россия

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Полимолочная кислота (PLA) широко используется в медицине и тканевой инженерии благодаря своей биосовместимости, биоразлагаемости и технологичности. Однако чистая PLA характеризуется хрупкостью, гидрофобностью и ограниченной остеоиндуктивностью, что требует ее модификации биоактивными компонентами. **Цель обзора:** проанализировать имеющиеся данные о композитах на основе PLA для регенерации костной ткани и определить наиболее перспективные области для их улучшения. **Материалы и методы.** Был проведен анализ экспериментальных исследований композитов на основе PLA с гидроксиапатитом, β-трикальцийфосфатом, биостеклом 45S5, минерализованным коллагеном, оксидом графена и целлюлозными нановолокнами. Были оценены пористость, прочность на сжатие, модуль упругости, биоразлагаемость, биоактивность и остеоиндуктивный потенциал, а также влияние технологий 3D-печати и наномодификации. **Результаты.** Введение минеральных и наноструктурированных наполнителей повышает механическую прочность и остеоиндуктивность каркасов из PLA. Композиты PLA/45S5 демонстрируют наиболее сбалансированное сочетание прочности, макропористости ≥70% и биоактивности. **Вывод.** Наиболее перспективным направлением является разработка композитов PLA с биоактивным стеклом 45S5, которые обеспечивают оптимальный баланс механических и биологических свойств для регенерации костной ткани.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полилактиды, скаффолды, регенерация костной ткани, стоматология.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Prospects for the use of polylactide-based scaffolds in dentistry: a literature review

A.A. Dolgalev¹, A.A. Taran¹, A.K. Zelensky¹, N.R. Radzhabov²

¹ FGBOU VO «Stavropol State Medical University», of the Ministry of Health of the Russian Federation, Russia

² «Dental Clinic 412 military hospital», Vladikavkaz, Russia

SUMMARY

Relevance. Polylactic acid (PLA) is widely used in medicine and tissue engineering due to its biocompatibility, biodegradability, and manufacturability. However, pure PLA is characterized by brittleness, hydrophobicity, and limited osteoinductivity, requiring its modification with bioactive components. **Objective of the review:** to analyze current data on PLA-based composites for bone tissue regeneration and identify the most promising areas for their improvement. **Materials and methods.** An analysis of experimental studies on PLA composites with hydroxyapatite, β-tricalcium phosphate, 45S5 bioglass, mineralized collagen, graphene oxide, and cellulose nanofibers was conducted. Porosity, compressive strength, elastic modulus, bioactivity and osteoinductive potential were assessed, as well as the impact of 3D printing and nanomodification technologies. **Results.** The introduction of mineral and nanostructured fillers increases the mechanical strength and osteoconductivity of PLA scaffolds. PLA/45S5 bioglass composites demonstrate the most balanced combination of strength, macroporosity ≥70%, and bioactivity. **Conclusion.** The most promising direction is the development of PLA composites with bioactive 45S5 glass, which provide an optimal balance of mechanical and biological properties for bone regeneration.

KEYWORDS: n

CONFLICT OF INTEREST. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Введение

В настоящее время полимолочная кислота (PLA) является одним из наиболее широко исследованных, а также применяемых биоразлагаемых алифатических полиэфиров. Благодаря хорошим физико-механическим свойствам, биосовместимости и технологичности этот материал широко применяется в медицине, имплантологии и тканевой инженерии [1].

PLA широко применяется для создания каркасных конструкций в костной тканевой инженерии. Этому способствуют хорошая перерабатываемость, биосовме-

стимость и возможность проектирования архитектуры скаффолд-структур [2]. Скаффолды представляют собой трехмерные пористые или волокнистые матрицы, основная функция которых состоит в обеспечении механического каркаса для клеток [3]. Альтернативой натуральным материалам для их создания как раз и служат такие синтетические полимеры, как PLA. Благодаря большому количеству методов синтеза и обработки материалов можно легко получить как необходимую форму, так и широкий спектр физико-химических свойств матриц [4].

PLA получают из возобновляемого сырья, в организме он гидролизует до α -гидроксикислоты, также включается в метаболические пути и выводится без токсического эффекта в виде углекислого газа и воды [5]. Полилактид биологически совместим с разными биологическими жидкостями, а также отличается сравнительно небольшими затратами энергии в ходе производства [6].

Впрочем, у данного материала имеются некоторые ограничения. Для него характерны высокая хрупкость, выраженная гидрофобность, химическая инертность поверхности, а также медленная, структурно-зависимая деградация (до нескольких лет *in vivo*) [1]. В связи с этим продолжаются исследования по созданию полимерных композиций на основе полилактида, способных нивелировать данные недостатки. Одним из практичных и экономически целесообразных способов улучшения его физико-биологических свойств является смешивание с биоактивными и армирующими добавками [7].

Свойства композитов на основе полилактида с включением гидроксиапатита и трикальцийфосфата

Исследования показывают, что включение неорганических солей, таких как гидроксиапатит (НА) и трикальцийфосфат (TCP), в полимерные каркасы, включающие полимолочную кислоту, может улучшить их остеоиндуктивные и механические свойства [8, 9].

Получение композитных каркасов путем смешивания НА и PLA обеспечило как хорошую биосовместимость и биоактивность [10], так и механические свойства PLA, что позволяет применять каркасы из PLA/НА в тканевой инженерии [11].

Целью исследования Zhang X и др. (2022) было создание методом 3D-печати композитного каркаса из PLA/НА с использованием стволовых клеток, полученных из мочи, для изучения его терапевтического эффекта на крысиной модели дефектов черепа. Исследуя механические свойства изготовленного композита PLA/НА, были получены следующие данные. Общая пористость скаффолдов превышала 60%, размер пор составлял 300–500 мкм, что обеспечивало условия для диффузии питательных веществ и удаления метаболитов. Скорость деградации PLA/НА была выше, чем у чистого PLA: через 8 недель степень деградации составила $53,6 \pm 2,2\%$ для PLA/НА и $49,0 \pm 0,7\%$ для PLA ($P \geq 0,05$).

Добавление гидроксиапатита значительно улучшало механические свойства. Модуль упругости PLA/НА ($169,45 \pm 30,46$ МПа) был примерно в 2 раза выше, чем у PLA ($84,62 \pm 12,45$ МПа), схожие данные по модулю упругости получены и другими авторами при изготовлении PLA/НА ($\sim 129 \pm 49$ МПа) [12], его значение сравнимо с показателями трабекулярной кости. Предельная прочность при деформации ($2,51 \pm 0,21$ МПа) – в 1,5 раза выше по сравнению с PLA ($1,65 \pm 0,19$ МПа). Это подтверждает усиление биомеханических характеристик композита при введении НА [13].

В работе Yanoso-Scholl L и др. (2010) испытания на сжатие продемонстрировали значительные различия между скаффолдами из PLA и PLA/ β -TCP. Максималь-

ная нагрузка, нагрузка при текучести и осевая жесткость PLA/ β -TCP-скаффолдов были почти вдвое выше по сравнению с PLA. При этом не выявлено статистически значимых различий в величине деформации при текучести и разрушении, что указывает на отсутствие различий в пластичности скаффолдов.

При нормировании на кажущуюся площадь поперечного сечения наблюдалась аналогичная тенденция: предельная прочность при сжатии, предел текучести (в напряжениях) и модуль упругости PLA/ β -TCP-скаффолдов были значительно выше, чем у PLA, тогда как относительные деформации при текучести и разрушении существенно не различались.

В исследовании оценивались каркасы из полимолочной кислоты, имевшие объемную пористость в диапазоне 30–40%, которая уменьшилась вдвое при включении в каркасы минеральных частиц β -TCP [14].

Важную роль играет и методика изготовления скаффолдов. Так существуют нанокompозитные каркасы из β -TCP (поли-L-молочная кислота/ β -TCP) с иерархической пористой структурой, изготовленные путем сочетания методов термически индуцированного фазового разделения и выщелачивания солей. Они характеризовались более выраженной пористостью (>93%) с размером пор до 300 мкм, а β -TCP улучшал механические свойства матрицы и поддерживал пролиферацию остеобластов [15].

Композитные полилактидные скаффолд-конструкции с добавлением биоактивных наполнителей

Перспективным направлением является разработка 3D-печатных композитных скаффолд-конструкций PLA с биоактивными наполнителями. В исследованиях был создан композит полилактид/45S5 биостекло (BG) для регенерации костной ткани [16]. Композит получали методом термически индуцированного фазового разделения с последующей экструзией в филамент для 3D-печати. Частицы биостекла равномерно распределялись в матрице PLA, что обеспечило увеличение прочности на сжатие на 80%. Прочность при сжатии составила 8 ± 2 МПа для PLA и 14 ± 2 МПа для PLA/BG, тогда как модуль упругости находился в диапазоне 2,3–2,8 ГПа, соответствуя требуемым значениям для трабекулярной кости (0,5–20 ГПа). Размер пор составлял 150–300 мкм, что оптимально для васкуляризации и остеогенеза. Авторы подчеркивают, что структура пор осталась благоприятной для применения в костной регенерации. Каркасы продемонстрировали отсутствие цитотоксичности *in vitro* и хорошую биосовместимость *in vivo*. Другие исследования скаффолдов из BG указывают, что чистые 45S5 скаффолды имели пористость 45–57% и поры 600 мкм, но механическая прочность была низкой (до $\sim 2,13$ МПа) из-за керамического характера материала и значительного «усадки» при обжиге [17].

Другим перспективным направлением является создание композитов на основе минерализованного коллагена и PLA. Минерализованный коллаген (тип I коллагена и гидроксиапатит) имитирует иерархическую структуру естественной костной ткани и обеспечивает благоприятную клеточную микросреду. В работе Zhu W. и соавт. (2023) по-

казано, что пористость MC/PLA-каркасов составляла $\geq 70\%$, что сопоставимо с губчатой костью (30–90%) и обеспечивает условия для роста сосудов и клеточной пролиферации [18]. Прочность при сжатии находилась в диапазоне 0,8–1,2 МПа, скорость биодеградации составляла около 6 месяцев. Несмотря на улучшение характеристик по сравнению с чистым минерализованным коллагеном, механические свойства оставались ниже показателей губчатой (2–12 МПа) и кортикальной кости (170–230 МПа), что указывает на необходимость дальнейшей модификации материала.

Использование наноматериального армирования полилактида оксидом графена и нановолкнами целлюлозы

В последнее время наноматериальное армирование стало прорывом в разработке композитных каркасов. Оксид графена (GO), двумерный углеродный наноматериал с сотовой кристаллической решеткой, привлек внимание в области биоматериалов благодаря своим исключительным механическим свойствам, большой удельной поверхности (~2600 м²/г) [19] и обилию поверхностных функциональных групп (–COOH, –OH, C–O–C) [20]. Эти особенности позволяют ГО: 1) служить наноармирующим материалом для улучшения механических свойств; 2) повышать гидрофильность поверхности; и 3) способствовать остеогенной дифференцировке путем активации сигнальных путей, таких как Wnt/ β -катенин и MAPK [21, 22], повышая экспрессию ключевых маркеров, включая RUNX2 и остеокальцин.

Согласно исследованию Liu S и др. (2025) механические свойства скаффолд-конструкций PLA/CPP/GO зависят от содержания графеноксида (GO).

При добавлении 0,5% GO модуль упругости снижался по сравнению с образцом без GO, однако при 1,0–1,5% наблюдалось значительное повышение. Максимальный модуль и прочность при сжатии составили 2,34 МПа при содержании 1,5% GO. При увеличении концентрации до 2,0% оба показателя снижались из-за агломерации частиц и уменьшения кристалличности PLA.

Композиты PLA/CPP/GO с содержанием GO (0,5–2 wt%), где wt% – массовая доля вещества в процентах от общей массы композита) демонстрируют очень высокую пористость > 87%, при этом наибольшая – 93% при 1 wt% GO, что соответствует требованиям по пористости $\geq 70\%$ для костных скаффолдов.

Размеры пор в этих конструкциях были большими и интерконнектированными, благоприятными для миграции клеток и васкуляризации.

Сжатие: композит с оптимальным GO показал прочность при сжатии $\approx 2,34$ МПа и модуль порядка тех же значений; такие значения по прочности находятся в диапазоне губчатой кости (2–20 МПа).

Эти скаффолды также демонстрировали улучшенную гидрофильность и биоминерализацию, а также активацию ALP-активности остеобластов.

Прочность при сжатии образцов с 0,5–1,5% GO превышала 2,1 МПа, что соответствует диапазону прочности губчатой кости (2–20 МПа).

Оптимальным содержанием GO является 1,0–1,5%, обеспечивающее наилучшие механические характеристики.

Включение 0,5 wt% оксида графена наиболее эффективно способствовало проявлению остеоиндуктивных свойств [23].

Интересным направлением разработки биополимерных каркасов являются композитные материалы на основе полилактида (PLA) и нановолокон целлюлозы (CNF). В исследовании Zhang Z., Cao B., Jiang N. (2023) показано, что прочность при растяжении композитов CNF/PLA составила 44,0 МПа, что на 7,4% ниже, чем у чистого PLA, вследствие слабой межфазной адгезии и агломерации гидрофильных CNF в гидрофобной матрице. При этом модуль упругости увеличился на 18,4%, однако относительное удлинение при разрыве снизилось, что указывает на повышение хрупкости материала.

После 14 суток деградации при 37 °C прочность композита с 0,5 wt% CNF уменьшилась на 8,9% из-за снижения молекулярной массы PLA и формирования микропустот. Наличие CNF ускорило деградацию: при 50 °C снижение M_n (средняя числовая молекулярная масса) и M_w (средняя весовая молекулярная масса) было на 7,96% и 4,91% больше по сравнению с чистым PLA. Установлено, что 60 суток при 37 °C эквивалентны 14 суткам при 50 °C по скорости деградации [24].

Полилактидные скаффолды, включающие в свой состав факторы остеогенной дифференцировки и антимикробные пептиды

Одним из новых векторов развития композитов полилактидов стали материалы, которые помимо полимеров, создающих молекулярную структуру образца, содержат вещества с известными фармако-биологическими свойствами свойствами.

В последние годы метод осаждения полидопамина для включения пептидов или факторов роста также широко используется для улучшения регенеративной способности клеток при регенерации костной ткани *in vitro* и *in vivo* [25].

Среди биологически активных факторов, связанных с остеогенезом, костный морфогенетический белок-2 (BMP-2) является центральным сигнальным фактором, индуцирующим остеогенную дифференцировку мезенхимальных стволовых клеток, что делает его ключевым биологическим агентом в конструкциях для регенерации костной ткани и позволяет широко использовать в тканевой инженерии для восстановления костных дефектов [26, 27].

BMP-2 может улучшать экспрессию генов во время остеогенной дифференцировки *in vitro*, в том числе остеоопонтина, остеокальцина, костного сиалопротеина и щелочной фосфатазы [28, 29].

В исследовании Chen L и др. (2019) инициировали иммобилизацию BMP-2 и понерицина G1 (антибактериальный пептид из яда муравьев, обладает выраженной устойчивостью и антибактериальной активностью) [30] с помощью полидопамина на 3D-печатных PLGA поли

(молочная-ко--гликолевая кислота)-матрицах для усиления адгезии клеток и остеогенной дифференцировки мышечных преостеобластов (MC3T3-E1) *in vitro*.

Для оценки прочности были определены показатели при сжатии для скаффолдов на основе PLGA и pDA-PLGA.

PLGA-скаффолд: прочность при сжатии при σ_c (20%) (σ_c – прочность на сжатие, 20% – контрольная деформация) составила $16,74 \pm 1,62$ МПа. pDA-PLGA-скаффолд продемонстрировал сходные значения прочности, что свидетельствует о том, что покрытие полидопамином (pDA) не повлияло на механическую прочность 3D-печатных PLGA-каркасов.

Полученные значения находятся в диапазоне прочности губчатой костной ткани, что подтверждает их пригодность для биомиметического проектирования скаффолдов для костной регенерации [31].

Заключение

Подводя итоги, можно выделить наиболее подходящие для представленных в обзоре составы композитного материала на основе полилактида. Анализ литературных данных, показывает, что среди рассмотренных композитов на основе полилактидов наибольший потенциал соответствия техническим требованиям проекта демонстрируют системы, сочетающие биоактивные минеральные наполнители с контролируемой макропористой архитектурой.

Кальцийфосфатные наполнители (гидроксиапатит и β -ТСР) достоверно повышают модуль упругости и osteoconductivity, однако при высокой пористости (>60%) их прочность при сжатии часто остается в диапазоне 2–8 МПа.

Композиты PLA/СРР/GO характеризуются высокой пористостью (87–93%), развитой интерконнектированной структурой и механическими характеристиками, соответствующими нижнему диапазону губчатой кости (прочность при сжатии ~2,34 МПа). Данные материалы демонстрируют выраженную osteoconductivity и биоминерализацию, что делает их перспективными с точки зрения биологической интеграции. Однако уровень прочности находится на нижней границе физиологического диапазона и требует дополнительной оптимизации.

Композиты MC/PLA обеспечивают пористость $\geq 70\%$ и подтвержденную биорезорбцию в течение ~6 месяцев *in vivo*, что соответствует требованию по срокам деградации. Тем не менее их механическая прочность (0,8–1,2 МПа) существенно ниже требуемого диапазона 10–30 МПа, что ограничивает их применение в условиях функциональной нагрузки.

PLA/целлюлозные композиты повышают жесткость и гидрофильность, ускоряют биорезорбцию и улучшают клеточную адгезию, однако не обеспечивают достаточной прочности для нагрузочных дефектов без дополнительного армирования.

Наиболее сбалансированными по совокупности механических и биологических свойств являются композиты PLA/45S5 биостекло. Добавление 45S5 приводит к увеличению прочности примерно на 80% по сравнению с чистым PLA при сохранении контролируемой поровой

архитектуры. Биостекло обеспечивает биоактивность и стимуляцию остеогенеза, а PLA-матрица – контролируемую биорезорбцию и технологичность при 3D-печати. Тем самым при оптимизации содержания биостекла возможно достижение диапазона прочности 10–30 МПа при сохранении макропористости, соответствующей требованиям регенерации костной ткани.

С учетом анализа механических характеристик, пористости, биоактивности и потенциала контролируемой резорбции, наиболее рациональным выбором для дальнейшей разработки представляется PLA-композит, модифицированный биоактивным стеклом 45S5, как обеспечивающий оптимальный баланс прочности, биологической активности и технологической воспроизводимости.

В качестве альтернативной стратегии усиления может рассматриваться комбинированный подход (PLA/45S5 с дополнительной наномодификацией), позволяющий повысить механическую стабильность без снижения пористости.

Список литературы / References

1. Rajewska J, Kowalski J, Matys J, Dobrzyński M, Wiglusz RJ. The Use of Lactide Polymers in Bone Tissue Regeneration in Dentistry – A Systematic Review. *J Funct Biomater*. 2023 Jan 31;14(2):83. doi: 10.3390/jfb14020083. PMID: 36826882; PMCID: PMC9961440.
2. Alavi MS, Memarpour S, Pazhohan-Nezhad H, et al. Applications of poly(lactid acid) in bone tissue engineering: A review article. *Artif Organs*. 2023;47(9):1423–1430. doi:10.1111/aor.14612.
3. Stella J.A., D'Amore A., Wagner W.R., Sacks M.S. On the biomechanical function of scaffolds for engineering load-bearing soft tissues. *Acta Biomater* 2010;6(7): 2365–2381. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2010.01.001>
4. Кузнецова Д.С., Тимашев П.С., Баграташвили В.Н., Загайнова Е.В. Костные имплантаты на основе скаффолдов и клеточных систем в тканевой инженерии (обзор). *Соврем. технол. мед.* 2014. 6(4):201–212. <https://cyberleninka.ru/article/n/kostnye-implantaty-na-osnove-skaffoldov-i-kletochnyh-sistem-v-tkanevoy-inzhenerii-obzor>.
Kuznetsova D.S., Timashev P.S., Bagratashvili V.N., Zagaynova E.V. Scaffold- and Cell System-Based Bone Grafts in Tissue Engineering (Review) *Sovremennye tehnologii v medicine*. 2014;6(4):201–212.
5. da Silva D, Kaduri M, Poley M, et al. Biocompatibility, biodegradation and excretion of polylactic acid (PLA) in medical implants and theranostic systems. *Chem Eng J*. 2018;340:9–14. doi:10.1016/j.cej.2018.01.010.
6. Trivedi A.K., Gupta M., and Singh H. PLA based biocomposites for sustainable products: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2023, vol. 6, no. 4, pp. 382–395.
7. Domb A.J., Kumar N. *Biodegradable Polymers in Clinical Use and Clinical Development*. John Wiley & Sons; 2011.
8. Bernardo MP, da Silva BCR, Hamouda AEI, de Toledo MAS, Schalla C, Rütten S, Goetzke R, Mattoso LHC, Zenke M, Sechi A. PLA/Hydroxyapatite scaffolds exhibit *in vitro* immunological inertness and promote robust osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells without osteogenic stimuli. *Sci Rep*. 2022 Feb 11;12(1):2333. doi: 10.1038/s41598-022-05207-w. PMID: 35149687; PMCID: PMC8837663.
9. Wang B, Ye X, Chen G, et al. Fabrication and properties of PLA/ β -TCP scaffolds using liquid crystal display (LCD) photocuring 3D printing for bone tissue engineering. *Front Bioeng Biotechnol*. 2024;12:1273541. Published 2024 Feb 19. doi:10.3389/fbioe.2024.1273541.
10. Zhang H, Mao X, Du Z, et al. Three dimensional printed macroporous polylactic acid/hydroxyapatite composite scaffolds for promoting bone formation in a critical-size rat calvarial defect model. *Sci Technol Adv Mater*. 2016;17:136. doi: 10.1080/14686996.2016.1145532
11. Zimina A, Senatov F, Choudhary R, Kolesnikov E, Anisimova N. Biocompatibility and Physico-Chemical Properties of Highly Porous PLA/HA Scaffolds for Bone Reconstruction. 2020;12:2938. 10.3390/polym12122938.
12. Bernardo, M.P., da Silva, B.C.R., Hamouda, A.E.I. et al. PLA/Hydroxyapatite scaffolds exhibit *in vitro* immunological inertness and promote robust osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells without osteogenic stimuli. *Sci Rep* 12, 2333 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05207-w>.
13. Zhang X, Chen JL, Xing F, Duan X. Three-dimensional printed polylactic acid and hydroxyapatite composite scaffold with urine-derived stem cells as a treatment for bone defects. *J Mater Sci Mater Med*. 2022 Oct 3;33(10):71. doi: 10.1007/s10856-022-06686-z. PMID: 36190568; PMCID: PMC9529701.
14. Yanoso-Scholl L, Jacobson JA, Bradica G, Lerner AL, O'Keefe RJ, Schwarz EM, Zusick MJ, Awad HA. Evaluation of dense polylactic acid/beta-tricalcium phosphate scaffolds for bone tissue engineering. *J Biomed Mater Res A*. 2010 Dec 1;95(3):717–26. doi: 10.1002/jbm.a.32868. PMID: 20725979; PMCID: PMC2958236.

15. Lou T, Wang X, Song G, Gu Z, Yang Z. Fabrication of PLLA/ β -TCP nanocomposite scaffolds with hierarchical porosity for bone tissue engineering. *Int J Biol Macromol.* 2014;69:464–470. doi:10.1016/j.ijbiomac.2014.06.004.
16. Sultan S. et al., 2022. The Design of 3D-Printed Poly(lactic Acid)-Bioglass Composite Scaffold: A Potential Implant Material for Bone Tissue Engineering. *Molecules*, 27, 7214. <https://doi.org/10.3390/molecules27217214>.
17. Dong Z, Gong J, Zhang H, Ni Y, Cheng L, Song Q, Tang L, Xing F, Liu M, Zhou C. Preparation and Characterization of 3D Printed Porous 4555 Bioglass Bioceramic for Bone Tissue Engineering Application. *Int J Bioprint.* 2022 Sep 1;8(4):613. doi: 10.18063/ijb.v8i4.613. PMID: 36404785; PMCID: PMC9668581.
18. Zhu W. et al., 2023. Mineralized Collagen/Poly(lactic Acid) Composite Scaffolds for Load-Bearing Bone Regeneration in a Developmental Model. *Polymers*, 15, 4194. <https://doi.org/10.3390/polym15204194>.
19. Šupová M. The Significance and Utilisation of Biomimetic and Bioinspired Strategies in the Field of Biomedical Material Engineering: The Case of Calcium Phosphate-Protein Template Constructs. *Materials (Basel).* 2020;13(2):327. Published 2020 Jan 10. doi:10.3390/ma13020327.
20. Wong SHM, Lim SS, Tiong TJ, Show PL, Zaid HFM, Loh HS. Preliminary In Vitro Evaluation of Chitosan-Graphene Oxide Scaffolds on Osteoblastic Adhesion, Proliferation, and Early Differentiation. *Int J Mol Sci.* 2020;21(15):5202. Published 2020 Jul 22. doi:10.3390/ijms21155202.
21. Shen G, Ren H, Shang Q. et al. Foxf1 knockdown promotes BMSC osteogenesis in part by activating the Wnt/ β -catenin signalling pathway and prevents ovariectomy-induced bone loss. *EBioMedicine.* 2020;52:102626. doi:10.1016/j.ebiom.2020.102626.
22. Xu D, Wang C, Wu J, et al. Effects of Low-Concentration Graphene Oxide Quantum Dots on Improving the Proliferation and Differentiation Ability of Bone Marrow Mesenchymal Stem Cells through the Wnt/ β -Catenin Signaling Pathway. *ACS Omega.* 2022;7(16):13546–13556. Published 2022 Apr 18. doi:10.1021/acsomega.1c06892.
23. Liu S, Zhang C, Li J, Zhang J, Wang Y, Hua J, Zheng Y. Fabrication and evaluation of PLA/CPP/GO composite scaffolds: the role of graphene oxide content in regulating properties. *RSC Adv.* 2025 Oct 31;15(49):41934–41945. doi: 10.1039/d5ra07168b. PMID: 41181028; PMCID: PMC12576886.
24. Zhang, Z.; Cao, B.; Jiang, N. The Mechanical Properties and Degradation Behavior of 3D-Printed Cellulose Nanofiber/Poly(lactic Acid) Composites. *Materials* 2023, 16, 6197. <https://doi.org/10.3390/ma16186197>.
25. Wang Z, Chen L, Wang Y, Chen X, Zhang P. Improved Cell Adhesion and Osteogenesis of op-HA/PLGA Composite by Poly(dopamine)-Assisted Immobilization of Collagen Mimetic Peptide and Osteogenic Growth Peptide. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2016;8(40):26559–26569. doi:10.1021/acsami.6b08733
26. Carreira AC, Alves GG, Zambuzzi WF, Sogayar MC, Granjeiro JM. Bone Morphogenetic Proteins: structure, biological function and therapeutic applications. *Arch Biochem Biophys.* 2014;561:64–73. doi:10.1016/j.abb.2014.07.011.
27. James AW. Review of Signaling Pathways Governing MSC Osteogenic and Adipogenic Differentiation. *Scientifica (Cairo).* 2013;2013:684736. doi:10.1155/2013/684736.
28. Koch FP, Weinbach C, Huster E, Al-Nawas B, Wagner W. GDF-5 and BMP-2 regulate bone cell differentiation by gene expression of *MSX1*, *MSX2*, *Dlx5*, and *Runx2* and influence *OCN* gene expression in vitro. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 2012;32(3):285–293.
29. La W. G. et al., Bone morphogenetic protein-2 for bone regeneration – dose reduction through graphene oxide-based delivery. *Carbon.* 2014;78:428–438. doi: 10.1016/j.carbon.2014.07.023.
30. Yanrui Chen, Xingran Zhang, Fang Li, Jinxing Ma, Zhiwei Wang. Construction of antimicrobial peptides/alginate multilayers modified membrane: Anti-biofouling performance and mechanisms. *Chemical Engineering Journal, Volume 472, 2023, 144814, ISSN 1385-8947.* <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144814>.
31. Chen L, Shao L, Wang F, Huang Y, Gao F. Enhancement in sustained release of antimicrobial peptide and BMP-2 from degradable three dimensional-printed PLGA scaffold for bone regeneration. *RSC Adv.* 2019 Apr 4;9(19):10494–10507. doi: 10.1039/c8ra08788a. PMID: 35515290; PMCID: PMC9062520.

Статья поступила / Received 21.02.2026

Получена после рецензирования / Revised 21.02.2026

Принята в печать / Accepted 22.02.2026

Информация об авторах

Долгалев Александр Александрович¹ – д.м.н., профессор, профессор кафедры стоматологии общей практики и детской стоматологии, E-mail: dolgalev@dolgalev.pro. SPIN-код: 5941-5771. AuthorID: 831419. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6352-6750>

Таран Артем Алексеевич¹ – студент 4 курса лечебного факультета E-mail: aptem082004@gmail.com. SPIN-код: 1109–5755. AuthorID: 1303770. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3004-8285>

Зеленский Андрей Константинович¹ – студент 5 курса стоматологического факультета

E-mail: andrey2003zel@mail.ru. SPIN-код: 3869-1655. AuthorID: 1259861.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9728-4910>

Раджабов Нариман Раджабович² – врач стоматолог-ортопед, стоматолог-хирург, начальник стоматологического отделения, E-mail: radzhabov1982@inbox.ru

¹ ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный медицинский университет», Министерства здравоохранения РФ, Ставрополь, Россия

² ФГКУ «412 военный госпиталь Министерства обороны Российской Федерации», Владикавказ, Россия

Контактная информация:

Таран Артем Алексеевич. E-mail: aptem082004@gmail.com

Author information

Dolgalev Alexander Alexandrovich¹ – MD, Professor, Professor of the Department of General Practice Dentistry and Pediatric Dentistry

E-mail: dolgalev@dolgalev.pro. SPIN-код: 5941-5771. AuthorID: 831419.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6352-6750>

Taran Artyom Alekseevich¹ – a 4th year student of the Faculty of Medicine

E-mail: aptem082004@gmail.com. SPIN-код: 1109–5755. AuthorID: 1303770.

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-3004-8285>

Zelensky Andrey Konstantinovich¹ – a 5th year student of the Faculty of Dentistry

E-mail: andrey2003zel@mail.ru. SPIN-код: 3869-1655. AuthorID: 1259861.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9728-4910>

Radzhabov Nariman Radzhabovich² – dentist-orthopedist, dentist-surgeon, head of dental department

E-mail: radzhabov1982@inbox.ru

¹ FGBOU VO («Stavropol State Medical University»), of the Ministry of Health of the Russian Federation, Russia

² «Dental Clinic 412 military hospital», Vladikavkaz, Russia

Contact information

Taran Artyom Alekseevich. E-mail: aptem082004@gmail.com

Для цитирования: Долгалев А.А., Таран А.А., Зеленский А.К., Раджабов Н.Р. Перспективы применения скаффолдов на основе полилактида в стоматологии. Обзор литературы. *Медицинский алфавит.* 2026;(1):7–11. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2026-1-7-11>

For citation: Dolgalev A.A., Taran A.A., Zelensky A.K., Radzhabov N.R. Prospects for the use of polylactide-based scaffolds in dentistry: a literature review. *Medical alphabet.* 2026;(1):7–11. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2026-1-7-11>

