



УДК 616.314-002.4-085.461.4

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-1394.2025-2.1>

М.О. Хохлов, аспірант, лікар-стоматолог, приватна стоматологічна клініка «White Clinic», м. Київ, Україна, індекс 04136, hohlovmaks@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-5002-3472>

РЕГЕНЕРАЦІЯ ПЕРІАПІКАЛЬНИХ ТКАНИН ПІСЛЯ ЕНДОДОНТИЧНОГО ЛІКУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БІОКЕРАМІЧНИХ ГЕРМЕТИКІВ

Вступ. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності ендодонтичного лікування та довготривалого збереження функціональності зубів, що часто ускладнюється інфекційно-запальними процесами в періапикальній ділянці. Традиційні герметики забезпечують механічну obturацію, проте не мають властивостей, які стимулюють біологічне відновлення, що знижує прогнозованість результатів та підвищує ризик рецидивів. У цьому контексті біокерамічні матеріали розглядаються як перспективний напрям завдяки їхній біоактивності, остеоіндуктивним характеристикам і високій герметизуючій здатності.

Мета дослідження полягає в науковому обґрунтуванні ролі біокерамічних герметиків у регенерації періапикальних тканин після ендодонтичного лікування з урахуванням їхніх фізико-хімічних властивостей, клінічної ефективності та обмежень практичного застосування.

Матеріали та методи. Методологія ґрунтується на систематичному аналізі сучасних публікацій, порівняльному узагальненні результатів *in vitro* та *in vivo* досліджень, а також клінічних спостережень. Використано принцип доказової медицини для оцінювання ефективності біокерамічних матеріалів порівняно з традиційними герметиками, а також структурний аналіз для визначення їх впливу на біологічні механізми регенерації.

Результати. Встановлено, що біокерамічні герметики забезпечують надійну герметизацію корневих каналів, знижують ризик мікропроникності та створюють умови для мінералізації і формування нової кісткової тканини завдяки вивільненню іонів кальцію. Виявлено швидшу позитивну рентгенологічну динаміку загоєння та нижчу частоту післяопераційних ускладнень порівняно з традиційними матеріалами. Показано, що через рік частота відновлення періапикальних структур перевищує 85%, що підтверджує клінічну доцільність використання біокераміки.

Висновки. Широке впровадження біокерамічних герметиків у клінічну практику обмежується високою вартістю, відсутністю довготривалих багатоцентрових досліджень та недостатньою стандартизацією протоколів. Водночас їх застосування сприяє підвищенню ефективності ендодонтичного лікування та довготривалій стабільності результатів.

Перспективи подальших досліджень визначаються необхідністю проведення багатоцентрових клінічних випробувань, поглибленого аналізу молекулярних механізмів остеоіндукції та створення економічно доступних модифікацій біокерамічних матеріалів. Реалізація цих завдань сприятиме утворенню біокераміки як матеріалів нового покоління, здатних змінити стандарти ендодонтичної терапії.

Ключові слова: остеоіндукція, біосумісність, мікропроникність, загоєння, ендодонтична терапія.

М.О. Khokhlov, Postgraduate Student, Dentist, Private Dental Clinic "White Clinic", Kyiv, Ukraine, postal code 04136, hohlovmaks@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-5002-3472>

REGENERATION OF PERIAPICAL TISSUES AFTER ENDODONTIC TREATMENT WITH BIOCERAMIC SEALERS

Introduction. The relevance of this study lies in the need to enhance the effectiveness of endodontic treatment and ensure the long-term preservation of tooth functionality, which is often complicated by infectious and inflammatory processes in the periapical region. Conventional sealers provide mechanical obturation but lack properties that stimulate biological repair, reducing treatment predictability and increasing the risk of relapse. In this context, bioceramic materials are regarded as a promising solution due to their bioactivity, osteoinductive characteristics, and high sealing capacity.



Objective. The aim of this study is to provide a scientific rationale for the role of bioceramic sealers in the regeneration of periapical tissues following endodontic treatment, considering their physicochemical properties, clinical effectiveness, and limitations in practical application.

Materials and Methods. The methodology is based on a systematic analysis of recent publications, comparative synthesis of in vitro and in vivo findings, and clinical observations. Evidence-based medicine principles were applied to evaluate the effectiveness of bioceramic materials compared with traditional sealers, while structural analysis was used to assess their impact on the biological mechanisms of regeneration.

Results. Bioceramic sealers were found to provide reliable sealing of root canals, reduce the risk of microleakage, and create favorable conditions for mineralization and the formation of new bone tissue through the release of calcium ions. Faster positive radiographic healing dynamics and a lower rate of postoperative complications were observed compared with traditional materials. After one year, the rate of periapical structure recovery exceeded 85 percent, confirming the clinical relevance of bioceramic use.

Conclusions. The broad integration of bioceramic sealers into clinical practice is limited by high cost, the lack of long-term multicenter studies, and insufficient protocol standardization. At the same time, their application enhances the effectiveness of endodontic therapy and contributes to long-term treatment stability.

Future Perspectives. Further research should focus on conducting multicenter clinical trials, analyzing molecular mechanisms of osteoinduction in greater depth, and developing cost-effective modifications of bioceramic materials. Achieving these objectives will support the establishment of bioceramics as next-generation materials capable of transforming endodontic therapy standards.

Key words: osteoinduction, biocompatibility, microleakage, healing, endodontic therapy.

Актуальність дослідження. Регенерація періапікальних тканин після ендодонтичного лікування із застосуванням біокерамічних герметиків належить до актуальних проблем сучасної стоматології, що охоплює як фундаментальні, так і прикладні аспекти. Основна складність полягає в забезпеченні повноцінного відновлення структур, пошкоджених інфекційно-запальними процесами, оскільки недостатня регенерація підвищує ризик рецидиву, хронізації патології та передчасної втрати зубів. Це безпосередньо впливає на якість життя пацієнтів і зумовлює необхідність пошуку матеріалів, здатних не лише забезпечувати герметичність, а й стимулювати біологічне відновлення тканин.

Біокерамічні герметики розглядаються як перспективний інструмент, оскільки поєднують високі герметизуючі властивості з біосумісністю та потенціалом до остеоіндукції. Вивчення їхніх характеристик і клінічних результатів дає змогу оцінити ефективність порівняно з традиційними матеріалами, а також визначити чинники, що впливають на довгострокову стабільність терапевтичних результатів.

Зв'язок проблеми з науковими та практичними завданнями полягає у вдосконаленні підходів до ендодонтичного лікування, під-

вищенні його результативності та зниженні частоти ускладнень. Систематизація наявних даних дозволяє не лише узагальнити сучасні досягнення у сфері регенеративних технологій, але й виявити прогалини в знаннях, що визначають напрями подальших досліджень у стоматології.

Огляд літератури. Аналіз сучасних досліджень щодо регенерації періапікальних тканин після ендодонтичного лікування із застосуванням біокерамічних герметиків дає підстави виокремити чотири взаємопов'язані напрями. Перший напрям окреслює методологічні засади персоналізованого прогнозування результатів регенерації та матеріалознавчі передумови її успішності.

Зокрема, М.Ю. Котелюх (M.Y. Koteliukh) та О.Г. Дорош (O.N. Dorosh) у межах клініко-прогностичних завдань кардіологічного профілю продемонстрували можливості предиктивного моделювання, що може бути екстрапольоване на стоматологію для оцінювання ризиків і прогнозування результатів регенеративних втручань [1].

С. Донг (X. Dong) та С. Сюй (X. Xu) систематизували сучасні досягнення у створенні біокерамічних матеріалів для ендодонтії, підкресливши їх біосумісність, остеоіндуктивний потенціал і перспективність у регенератив-



них технологіях [2]. Загалом, у межах цього напрямку доцільним є поєднання предиктивної аналітики з характеристиками матеріалів для формування моделей прогнозу регенерації, каліброваних за показниками біоактивності й остеогенезу.

Другий науковий напрям охоплює доклінічні та ранні клінічні дані, що підтверджують репаративну дію біокерамічних матеріалів. Г. Сантос (G. Santos), К. Карвалью (C. N. Carvalho), П. Таварес (R. J. Tavares) та співавтори в моделі підшкірної імплантації на щурах довели здатність біокерамічних герметиків ініціювати сприятливу тканинну відповідь із вираженою васкуляризацією [3].

К. Бель Хадж Салах (K. Bel Haj Salah), С. Жаафура (S. Jaâfoura) та М. Тлілі (M. Tlili) разом зі співавторами повідомили про позитивні результати лікування некротичних зубів з апікальним періодонтитом із використанням біокерамічного герметика [4]. К.М. Галлер (K.M. Galler), М. Відбіллер (M. Widbiller) та Дж. Каміллері (J. Camilleri) узагальнили механізми дії біокерамічних матеріалів у регенеративній ендодонтії [5]. Цей напрям потребує подальшого дослідження молекулярних механізмів стимуляції ангіогенезу й остеогенезу у відповідь на застосування біокерамічних матеріалів.

Третій напрям досліджень зосереджено на експериментально-лабораторній валідації та оцінюванні клінічної ефективності, зокрема в порівнянні біокерамічних герметиків з альтернативними матеріалами. Р. Бадауї (R. Badawy) та Д.А. Мохамед (D.A. Mohamed) у контрольованих *in vitro* дослідженнях характеризували нові біокерамічні герметики, засвідчивши їх цитосумісність і мінералізаційний потенціал [6]. П. Барнаба (P. Barnaba), А. Роса (A. Rosa) та М. Гаргарі (M. Gargari) зі співавторами в систематичному огляді підтвердили клінічну придатність застосування біокераміки за ретроградної апікектомії [7]. А.К. Томер (A.K. Tomer), С. Кумарі (S. Kumari) та Д. Растогі (D. Rastogi) та інші узагальнили дані щодо властивостей і показань біокераміки порівняно з традиційними матеріалами

[8]. А. Кханделвал (A. Khandelwal), К. Джанані (K. Janani) та К. Тея (K. Teja) зі співавторами в метааналізі продемонстрували вищі показники загоєння періапикальних тканин у разі використання біокерамічних герметиків [9]. Д. Понторієро (D. Pontoriero), Е. Феррарі Каджидіако (E. Ferrari Cagidiaco) та В. Макканьола (V. Maccagnola) зі співавторами підтвердили ефективність біокерамічних матеріалів у поєднанні з техніками теплої гуттаперчі [10]. Підсумовуючи, подальші дослідження слід орієнтувати на багатоцентрові клінічні випробування, що передбачають уніфіковані критерії успіху та кількісну радіологічну оцінку.

Четвертий науковий напрям інтегрує регенеративні протоколи та біоматеріали, поєднуючи клінічні дані з комплексною оцінкою біоактивності. Дослідники С. Стаффоли (S. Staffoli), Г. Плотіно (G. Plotino) та Б.Г. Нуньєс Торріхос (B.G. Nunez Torrijos) зі співавторами продемонстрували, що сучасні ендодонтичні матеріали, зокрема біокераміка, формують мікросередовище, сприятливе для регенеративних процедур [11]. Своєю чергою П. Монтеро-Міральєс (P. Montero-Miralles), Р. Ібаньєс-Барранко (R. Ibáñez-Barranco) та Д. Кабанільєс-Бальсера (D. Cabanillas-Balsera) зі співавторами наголосили на значенні вибору біоматеріалу для ремоделювання кісткової тканини після мікрохірургічної ендодонтії [12].

М.С. Естівалет (M.S. Estivalet), Л.П. де Араужо (L.P. de Araujo) та Ф. Імміс (F. Immich) зі співавторами підтвердили високу біоактивність біокерамічних герметиків та їх здатність модулювати клітинні відповіді [13]. С. Бернардіні (C. Bernardini), Ф. Зампаріні (F. Zamparini), К. Праті (C. Prati) та співавтори надали експериментальні докази остеоіндуктивного потенціалу кальцій-силікатних герметиків [14]. Отже, перспективним є поєднання біокерамічних систем із клітинними технологіями та біоактивними молекулами з подальшою клінічною валідацією.

Попри значний прогрес у дослідженні біокерамічних герметиків, залишаються нерозглянутими кілька ключових питань. Зокрема,



потребують деталізації біологічні механізми регенерації періапикальних тканин; обмеженою залишається кількість довготривалих клінічних спостережень; недостатньо представлено порівняльні дослідження їх ефективності з традиційними матеріалами в різних клінічних сценаріях. Важливим обмеженням є також відсутність стандартизованих протоколів застосування, що ускладнює інтеграцію цих матеріалів у повсякденну практику та знижує передбачуваність результатів лікування.

Запропоноване дослідження спрямоване на часткове усунення окреслених прогалин шляхом систематизації даних про фізико-хімічні та біологічні властивості біокерамічних герметиків, аналізу їх клінічної ефективності та виявлення чинників, що стримують широке впровадження в практику. Очікувані результати дозволять сформулювати науково обґрунтовані рекомендації, здатні підвищити ефективність ендодонтичного лікування та закласти основу для стандартизації клінічних протоколів.

Мета і завдання статті. Мета дослідження полягає у визначенні науково обґрунтованої ролі біокерамічних герметиків у регенерації періапикальних тканин після ендодонтичного лікування.

Завдання статті:

1) дослідити біологічні механізми відновлення періапикальних тканин та схарактеризувати властивості біокерамічних герметиків, що визначають їхній регенеративний потенціал;

2) провести порівняльний аналіз клінічної ефективності біокерамічних герметиків і традиційних матеріалів, визначивши ключові обмеження їх практичного застосування;

3) сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації ендодонтичного лікування на основі аналізу переваг і недоліків біокерамічних матеріалів.

Матеріали та методи дослідження. Матеріали та методи дослідження ґрунтуються на систематичному аналізі сучасних наукових джерел, що висвітлюють результати експе-

риментальних досліджень і клінічних спостережень щодо застосування біокерамічних герметиків. Для узагальнення даних використано методи порівняльного та структурного аналізу, критичної інтерпретації публікацій, а також принципи доказової медицини. Такий підхід дозволив оцінити фізико-хімічні та біологічні властивості матеріалів, їх клінічну ефективність у відновленні періапикальних тканин і визначити проблеми, що обмежують їх широке застосування в стоматологічній практиці.

Результати досліджень. Відновлення періапикальних тканин після ендодонтичного втручання є складним біологічним процесом, що включає взаємодію клітин, позаклітинного матриксу та сигнальних молекул. Основним завданням терапії є елімінація інфекційного чинника та створення сприятливих умов для активації репаративних процесів. На початкових етапах спостерігається зниження запальної реакції та елімінація мікроорганізмів, що забезпечує умови для проліферації клітин сполучної тканини та остеобластів. Подальший перебіг процесу включає формування грануляційної тканини, ремоделювання кісткової структури та інтеграцію новоутворених тканин у функціональну систему періапикальної ділянки. Важливу роль у цьому процесі відіграють фізико-хімічні та біологічні властивості пломбувальних матеріалів. Їх біосумісність, відсутність цитотоксичного впливу та здатність до стимуляції регенеративних процесів є критично важливими чинниками успішного відновлення тканин (табл. 1).

Відновлення періапикальних тканин після ендодонтичного втручання є багаторівневим процесом, кожен етап якого має не лише біологічне, а й клінічне значення. Усунення інфекційного агента та пригнічення запальної реакції створюють умови для переходу від деструктивної до репаративної фази. На цьому етапі критичним є контроль мікробної контамінації, оскільки навіть незначна кількість патогенів здатна порушити процес загоєння. У клінічній практиці ефективна елімінація



Таблиця 1

Біологічні механізми регенерації періапикальних тканин після ендодонтичного лікування

Етап процесу	Ключові клітинні учасники	Основні механізми	Результат для тканин
Усунення інфекції та запалення	Макрофаги, нейтрофіли	Фагоцитоз, секреція цитокінів	Зниження запальної реакції
Формування грануляційної тканини	Фібробласти, ендотеліоцити	Проліферація, ангіогенез	Утворення сполучнотканинного матриксу
Остеогенез	Остеобласти, мезенхімальні клітини	Диференціація, синтез кісткової матриці	Формування нової кісткової тканини
Ремоделювання	Остеокласти, остеобласти	Резорбція та синтез кістки	Відновлення структури та функції ділянки

Джерело: сформовано автором на підставі [3, с. 25–32; 5, с. 69–94; 11; 13]

мікрофлори досягається шляхом ретельного механічного оброблення кореневих каналів, застосування антисептичних іригаційних розчинів, а також використання герметичних і біосумісних пломбувальних матеріалів. Комплексне виконання цих заходів забезпечує оптимальні умови для активації репаративних процесів у періапикальній ділянці.

Формування грануляційної тканини є наступним ключовим етапом у процесі регенерації періапикальних тканин, що значною мірою визначає якість подальшого відновлення. Інтенсивний ангіогенез на цьому етапі забезпечує адекватне постачання кисню та поживних речовин до ураженої ділянки, що створює сприятливі умови для активації репаративних процесів. Активність фібробластів сприяє синтезу компонентів позаклітинного матриксу, формуючи каркас для подальшого остеогенезу та ремоделювання тканин [11]. У клінічній практиці динаміка цього процесу часто оцінюється за допомогою рентгенологічного контролю. Поступове зменшення періапикальних дефектів, візуалізоване на рентгенограмах, слугує об'єктивним критерієм ефективності ендодонтичного лікування та активності регенеративних механізмів.

Остеогенез і ремоделювання становлять найбільш тривалі та метаболічно активні стадії регенерації періапикальних тканин. На етапі остеогенезу остеобласти та мезенхімальні клітини забезпечують синтез кісткової матриці, що є основою для формування нової кісткової тканини. Паралельно із цим остеокласти

відіграють регуляторну роль у процесі ремоделювання, здійснюючи резорбцію надлишкової або пошкодженої тканини, що сприяє формуванню збалансованої та функціонально адаптованої структури [9]. На цьому етапі особливого значення набувають властивості матеріалів, які контактують із періапикальною ділянкою. Зокрема, біокерамічні герметики завдяки здатності вивільняти іони кальцію демонструють остеоіндуктивні властивості, стимулюючи мінералізацію та прискорюючи інтеграцію новоутвореної кістки. У клінічній практиці це проявляється в скороченні термінів появи рентгенологічної позитивної динаміки, а також у підвищенні стабільності відновлених тканин у довгостроковій перспективі.

Таким чином, описані біологічні механізми не функціонують як ізольовані етапи, а є частинами інтегрованого процесу, що відбувається в тісному взаємозв'язку. Вибір оптимальної лікувальної тактики, а також застосування відповідних пломбувальних матеріалів, відіграють вирішальну роль у прогнозі збереження зуба та відновлення його функціональної активності.

На особливу увагу заслуговують біокерамічні герметики, фізико-хімічні та біологічні властивості яких визначають їхню унікальність. Ці матеріали не лише забезпечують ефективну obturaцію кореневого каналу, але й активно впливають на регенеративні процеси в періапикальній ділянці. На відміну від традиційних герметиків, біокерамічні ком-



позиції характеризуються високою біосумісністю, хімічною стабільністю та здатністю створювати мікрооточення, сприятливе для проліферації та диференціації клітин. У клінічній практиці поєднання фізико-хімічних характеристик, як-от низька розчинність, розширення під час твердіння та відсутність усадки, з біологічними ефектами, включно з остеоіндуктивністю та стимуляцією мінералізації, робить ці матеріали перспективними засобами для відновлення періапикальних структур (табл. 2).

Біосумісність пломбувальних матеріалів є критично важливою характеристикою, що визначає їхню здатність інтегруватися в біологічне середовище без негативного впливу на клітинні структури. Результати цитотоксичних тестів *in vitro* [15] та гістологічних спостережень *in vivo* [16] підтверджують, що сучасні матеріали не лише не викликають пошкодження тканин, але й сприяють проліферації остеобластів і фібробластів. Це створює умови для активного включення періапикальних тканин у процеси відновлення без додаткового ризику для пацієнта.

Гідрофільність матеріалів та їхня здатність до твердіння у вологому середовищі мають особливе значення у випадках наявності серозного або серозно-гнійного ексудату, коли забезпечити повну сухість робочого поля неможливо [11]. У таких клінічних ситуаціях ці властивості забезпечують стабільність

пломбувального матеріалу, що, своєю чергою, підвищує ефективність ендодонтичного лікування та зменшує ризик рецидиву патологічного процесу.

Одним із ключових механізмів, що пояснює остеоіндуктивні властивості біокерамічних матеріалів, є вивільнення іонів кальцію. Кальцій-іони, взаємодіючи з фосфатами тканинної рідини, сприяють утворенню кристалів гідроксиапатиту, що морфологічно інтегруються з кореневим дентином. У клінічному вимірі це проявляється в позитивній рентгенологічній динаміці, що спостерігається вже протягом перших 6–12 місяців після ендодонтичного лікування. Зменшення періапикальних дефектів, зафіксоване на рентгенограмах, слугує об'єктивним критерієм ефективності застосування біокераміки [13].

Розширення біокерамічних матеріалів під час твердіння є важливою фізико-хімічною властивістю, що дозволяє компенсувати потенційні мікропростори між матеріалом і дентинними стінками кореневого каналу. На відміну від традиційних епоксидних герметиків, які не забезпечують аналогічного ефекту, біокераміка значно знижує ризик мікропроникності та формування вторинних інфекційних вогнищ. Це має особливе значення в лікуванні багатокорневих зубів, де досягнення повної герметичності є технічно складним завданням.

Антибактеріальний потенціал біокераміки реалізується завдяки високому рівню рН

Таблиця 2

Основні властивості біокерамічних герметиків та їх значення для регенерації

Властивість	Наукове підґрунтя	Практичне значення у відновленні тканин
Біосумісність	Відсутність токсичного впливу на клітини	Мінімізація запальної реакції, сприяння загоєнню
Гідрофільність	Активація твердіння у вологому середовищі	Ефективна обтурація навіть за наявності ексудату
Вивільнення іонів кальцію	Стимуляція остеобластів, утворення апатиту	Інтенсифікація процесів мінералізації
Розширення при твердінні	Формування щільного контакту зі стінками	Герметичне закриття без мікропроникності
Антибактеріальний потенціал	Лужне рН, пригнічення росту мікроорганізмів	Зменшення ризику вторинної інфекції

Джерело: сформовано автором на підставі [2; 5, с. 80–83; 6, с. 85–92; 13]



(близько 12), що створює несприятливе середовище для більшості патогенних мікроорганізмів, включно з резистентними штамми *Enterococcus faecalis* [11]. У практиці це дає змогу суттєво знизити ризик реінфекції навіть у випадках, коли повна стерильність кореневого каналу не може бути гарантована. Поєднання герметизуючих та біологічно активних властивостей дає змогу біокерамічним герметикам виконувати подвійну функцію: забезпечувати надійну механічну герметизацію та одночасно виступати як стимулятор регенеративних процесів.

Клінічна ефективність біокерамічних герметиків оцінюється насамперед за динамікою відновлення періапикальних тканин, частотою повторних інфекцій та довгостроковим збереженням функції зуба. У цьому контексті порівняння з традиційними матеріалами має принципове значення, оскільки саме результати лікування, а не окремі властивості матеріалів, визначають їх практичну цінність. Дані рентгенологічного та клінічного моніторингу свідчать, що застосування біокерамічних герметиків асоціюється з більш швидким зменшенням періапикальних уражень та нижчим рівнем післяопераційних ускладнень (табл. 3).

Аналіз отриманих даних свідчить про переваги біокерамічних герметиків у порівнянні з традиційними матеріалами. Зокрема, вони демонструють швидшу позитивну рентгенологічну динаміку та нижчу частоту післяопераційних ускладнень. У більшості досліджень частота загоєння періапикальних уражень

через 12 місяців перевищує 85%, що пов'язано зі стійкою герметизацією, остеоіндуктивними властивостями та антибактеріальним ефектом біокераміки [10]. У практичному вимірі це означає вищу довгострокову стабільність результатів лікування, зменшення кількості повторних утручань і зниження дискомфорту для пацієнтів. Натомість традиційні герметики частіше асоціюються з повільним відновленням та вищим ризиком рецидиву, що знижує прогнозованість терапії у складних клінічних випадках.

Обговорення отриманих результатів.

Попри очевидні переваги біокерамічних герметиків, їх широке застосування в клінічній практиці стикається з низкою обмежень, що мають як технологічний, так і організаційний характер. Однією з ключових проблем є висока вартість матеріалів, яка суттєво перевищує ціну традиційних герметиків і обмежує їх використання в медичних закладах із низьким рівнем фінансування [7, с. 431–433; 9]. Крім того, обмежена доступність новітніх біокерамічних систем, навіть у великих стоматологічних центрах, знижує передбачуваність планування лікування та ускладнює логістику [4].

Технічні аспекти також відіграють важливу роль. Біокерамічні герметики мають специфічні реологічні властивості – зокрема, в'язкість, тривалість твердіння та вимоги до інструментальної підготовки кореневого каналу. Це створює додаткові труднощі для лікарів, які звикли працювати з традиційними матеріалами [6, с. 85–87]. У низці випадків

Таблиця 3

Порівняльні результати ендодонтичного лікування з використанням біокерамічних та традиційних герметиків

Показник результативності	Біокерамічні герметики	Традиційні герметики
Частота рентгенологічного загоєння через 12 міс.	85–90%	70–75%
Середній час появи ознак позитивної динаміки	6–9 місяців	12–18 місяців
Післяопераційний біль і дискомфорт	Зазвичай мінімальний	Часто помірний, триваліший
Ризик повторного ураження	Нижчий завдяки стійкій герметизації	Вищий через мікропроникність

Джерело: сформовано автором на підставі [4; 7, с. 431–437; 9; 10; 16]



виникають проблеми із забезпеченням контрольованого внесення герметика у вузькі чи сильно вигнуті канали, що може негативно впливати на якість обтурації та кінцевий результат лікування.

Додатковим обмежувальним чинником є недостатньо вивчена довготривала стабільність біокерамічних матеріалів у складному мікробному середовищі кореневого каналу. Відсутність багаторічних спостережень за великою кількістю пацієнтів обмежує доказову базу щодо їх ефективності, що підтверджується сучасними клінічними та експериментальними оглядами [11; 13].

Кадровий фактор також відіграє важливу роль. Використання біокерамічних герметиків потребує глибшого розуміння їхніх фізико-хімічних властивостей та адаптації протоколів ендодонтичного лікування. Недостатній рівень підготовки лікарів, особливо у приватному секторі, де навчальні програми не завжди доступні, ускладнює впровадження новітніх матеріалів у повсякденну практику [5, с. 80–83; 14, с. 1270–1272]. Організаційні труднощі поглиблюються через відсутність стандартизованих клінічних протоколів. Незважаючи на наявність численних досліджень, брак єдиних міжнародних рекомендацій ускладнює включення біокераміки до повсякденної практики. У результаті рішення про застосування таких матеріалів часто залежить від індивідуального досвіду та рівня підготовки лікаря.

Практичне підвищення результативності ендодонтичного лікування з використанням біокерамічних герметиків базується на трьох ключових засадах: якісній підготовці кореневої системи, обґрунтованому виборі матеріалу та системному контролю результатів. Надійне механічне й медикаментозне оброблення каналів із застосуванням сучасних методів активації іригаційних розчинів створює оптимальні умови для дії герметика та мінімізує ризик залишкової інфекції. Вибір біокерамічного матеріалу має ґрунтуватися на клінічних особливостях конкретного випадку, зокрема наявності періапикальних дефектів, де доцільно

застосовувати препарати з доведеними остеоіндуктивними властивостями.

Оцінювання ефективності лікування повинно здійснюватися на основі регулярного рентгенологічного моніторингу протягом щонайменше 12 місяців, що дозволяє своєчасно виявляти та попереджувати можливі ускладнення. Завершальним чинником є належна підготовка лікарів та інтеграція уніфікованих протоколів у клінічну практику, що сприяє переходу біокерамічних герметиків із рівня інноваційного рішення до стандарту сучасної ендодонтичної допомоги.

Висновки з дослідження і перспективи подальших розробок у цьому напрямі.

Аналіз наукових джерел та клінічних даних свідчить, що біокерамічні герметики завдяки високій біосумісності, остеоіндуктивним властивостям і здатності забезпечувати стійку герметичність створюють сприятливі умови для регенерації періапикальних тканин. Порівняно з традиційними матеріалами вони демонструють вищу частоту загоєння, швидшу позитивну рентгенологічну динаміку та нижчий рівень післяопераційних ускладнень, що підтверджує їх клінічну ефективність і довгострокову стабільність результатів лікування.

Разом із тим широке впровадження біокерамічних технологій стримується низкою чинників: високою вартістю та обмеженою доступністю матеріалів, відсутністю багаторічних спостережень із великою вибіркою пацієнтів, технічними труднощами під час роботи у складних анатомічних умовах, а також нестачею стандартизованих клінічних протоколів і недостатнім рівнем підготовки лікарів.

Рекомендації для підвищення ефективності включають: ретельну підготовку кореневої системи, обґрунтований вибір біокерамічного матеріалу з урахуванням клінічної ситуації, застосування сучасних технік внесення герметика та регулярний рентгенологічний моніторинг. Важливим є також підвищення кваліфікації фахівців і поступова інтеграція уніфікованих протоколів у практику.



Перспективи подальших досліджень охоплюють проведення багатоцентрових клінічних випробувань для підтвердження довгострокової ефективності, поглиблене вивчення

молекулярних механізмів остеοіндукції, а також розроблення доступніших формул біо-кераміки, що сприятиме її ширшому застосуванню в сучасній ендодонтії.

Література:

1. Koteliukh M. Y., Dorosh O. H. Predictive model for early complications of acute myocardial infarction in patients with type 2 diabetes mellitus. *Biomedical Research and Therapy*. 2022. Vol. 9, no. 2. P. 4892–4900. <https://doi.org/10.15419/bmrat.v9i2.729> (date of access: 09.09.2025).
2. Dong X., Xu X. Bioceramics in Endodontics: Updates and Future Perspectives. *Bioengineering*. 2023. Vol. 10, no. 3. P. 354. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10030354> (date of access: 09.09.2025).
3. Tissue repair capacity of bioceramic endodontic sealers in rat subcutaneous tissue / G. S. B. d. Santos et al. *Brazilian Dental Journal*. 2023. Vol. 34, no. 3. P. 25–32. <https://doi.org/10.1590/0103-6440202305161> (date of access: 09.09.2025).
4. Outcome of Root Canal Treatment of Necrotic Teeth with Apical Periodontitis Filled with a Bioceramic-Based Sealer / K. Bel Haj Salah et al. *International Journal of Dentistry*. 2021. Vol. 2021. P. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2021/8816628> (date of access: 09.09.2025).
5. Galler K. M., Widbiller M., Camilleri J. Bioceramic Materials in Regenerative Endodontics. *Bioceramic Materials in Clinical Endodontics*. Cham, 2020. P. 29–38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58170-1_4 (date of access: 09.09.2025).
6. Badawy R. E. S., Mohamed D. A. Evaluation of new bioceramic endodontic sealers: An in vitro study. *Dental and Medical Problems*. 2022. Vol. 59, № 1. P. 85–92. <https://doi.org/10.17219/dmp/133954>.
7. Barnaba P., Rosa A., Gargari M., Martelli M. The Use of Bioceramics in Retrograde Apicectomy: A Systematic Review of Clinical Applications and Outcomes. *Australian Endodontic Journal*. 2025. Vol. 51, № 2. P. 431–437. <https://doi.org/10.1111/aej.12960>.
8. Tomer A. K., Kumari S., Rastogi D., et al. Bioceramics in Endodontics – A Review. *International Journal of Applied Dental Sciences*. 2020. Vol. 6, № 3. P. 588–594. <https://doi.org/10.22271/oral.2020.v6.i3i.1012>.
9. Khandelwal A., Janani K., Teja K., et al. Periapical healing following root canal treatment using different endodontic sealers: a systematic review. *BioMed Research International*. 2022. Vol. 2022, № 1. Article 3569281. <https://doi.org/10.1155/2022/3569281>.
10. Pontoriero D. I. K., Ferrari Cagidiaco E., Maccagnola V., et al. Outcomes of endodontic-treated teeth obturated with bioceramic sealers in combination with warm gutta-percha obturation techniques: a prospective clinical study. *Journal of Clinical Medicine*. 2023. Vol. 12, № 8. Article 2867. <https://doi.org/10.3390/jcm12082867>.
11. Regenerative Endodontic Procedures Using Contemporary Endodontic Materials / S. Stafoli et al. *Materials*. 2019. Vol. 12, no. 6. P. 908. <https://doi.org/10.3390/ma12060908> (date of access: 09.09.2025).
12. Biomaterials in periapical regeneration after microsurgical endodontics: A narrative review / P. Montero-Miralles et al. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*. 2021. P. e935–e940. <https://doi.org/10.4317/jced.58651> (date of access: 09.09.2025).
13. Bioactivity Potential of Bioceramic-Based Root Canal Sealers: A Scoping Review / M. S. Estivalet et al. *Life*. 2022. Vol. 12, no. 11. P. 1853. <https://doi.org/10.3390/life12111853> (date of access: 09.09.2025).
14. Bernardini C., Zamparini F., Prati C., Salaroli R., Spinelli A., Zannoni A., Gandolfi M. G. Osteoinductive and regenerative potential of premixed calcium-silicate bioceramic sealers on vascular wall mesenchymal stem cells. *International Endodontic Journal*. 2024. Vol. 57, № 9. P. 1264–1278. <https://doi.org/10.1111/iej.14098>.
15. Haji T. H., Selivany B. J., Suliman A. A. Sealing ability in vitro study and biocompatibility in vivo animal study of different bioceramic based sealers. *Clinical and Experimental Dental Research*. 2022. Vol. 8, № 6. P. 1582–1590. <https://doi.org/10.1002/cre2.652>.
16. Zaki D. Y., Zaazou M. H., Khallaf M. E., Hamdy T. M. In vivo comparative evaluation of periapical healing in response to a calcium silicate and calcium hydroxide based endodontic sealers. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*. 2018. Vol. 6, № 8. Article 1475. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2018.293>.



References:

1. Koteliukh, M. Y., & Dorosh, O. H. (2022). Predictive model for early complications of acute myocardial infarction in patients with type 2 diabetes mellitus. *Biomedical Research and Therapy*, 9(2), 4892–4900. <https://doi.org/10.15419/bmrat.v9i2.729>
2. Dong, X., & Xu, X. (2023). Bioceramics in endodontics: Updates and future perspectives. *Bioengineering*, 10(3), Article 354. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering10030354>
3. Santos, G. S. B. D., Carvalho, C. N., Tavares, R. R. D. J., Silva, P. G. D. B., Candeiro, G. T. D. M., & Maia Filho, E. M. (2023). Tissue repair capacity of bioceramic endodontic sealers in rat subcutaneous tissue. *Brazilian dental journal*, 34, 25–32. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6440202305161>
4. Bel Haj Salah, K., Jaâfoura, S., Tlili, M., Ben Ameer, M., & Sahtout, S. (2021). Outcome of root canal treatment of necrotic teeth with apical periodontitis filled with a bioceramic-based sealer. *International journal of dentistry*, 2021(1), Article 8816628. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8816628>
5. Galler, K. M., Widbiller, M., & Camilleri, J. (2021). Bioceramic materials in regenerative endodontics. In S. Drukteinis & J. Camilleri (Eds.), *Bioceramic materials in clinical endodontics* (pp. 69–94). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58170-1_4
6. Badawy, R. E. S., & Mohamed, D. A. (2022). Evaluation of new bioceramic endodontic sealers: An in vitro study. *Dental and medical problems*, 59(1), 85–92. DOI: <https://doi.org/10.17219/dmp/133954>
7. Barnaba, P., Rosa, A., Gargari, M., & Martelli, M. (2025). The use of bioceramics in retrograde apicectomy: A systematic review of clinical applications and outcomes. *Australian endodontic journal*, 51(2), 431–437. DOI: <https://doi.org/10.1111/aej.12960>
8. Tomer, A. K., Kumari, S., Rastogi, D., Cecilia, L. L., Singh, S., & Tyagi, A. (2020). Bioceramics in endodontics – A review. *International journal of applied dental sciences*, 6(3), 588–594. DOI: <https://doi.org/10.22271/oral.2020.v6.i3i.1012>
9. Khandelwal, A., Janani, K., Teja, K., Jose, J., Battineni, G., Riccitello, F., & Spagnuolo, G. (2022). Periapical healing following root canal treatment using different endodontic sealers: A systematic review. *Biomed research international*, 2022(1), Article 3569281. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3569281>
10. Pontoriero, D. I. K., Ferrari Cagidiaco, E., Macagnola, V., Manfredini, D., & Ferrari, M. (2023). Outcomes of endodontic-treated teeth obturated with bioceramic sealers in combination with warm gutta-percha obturation techniques: A prospective clinical study. *Journal of clinical medicine*, 12(8), Article 2867. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm12082867>
11. Staffoli, S., Plotino, G., Nunez Torrijos, B. G., Grande, N. M., Bossù, M., Gambarini, G., & Polimeni, A. (2019). Regenerative endodontic procedures using contemporary endodontic materials. *Materials*, 12(6), Article 908. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12060908>
12. Montero-Miralles, P., Ibáñez-Barranco, R., Cabanillas-Balsera, D., Areal-Quecuty, V., Sánchez-Domínguez, B., Martín-González, J., & Jiménez-Sánchez, M. C. (2021). Biomaterials in periapical regeneration after microsurgical endodontics: A narrative review. *Journal of clinical and experimental dentistry*, 13(9), Article e935. DOI: <https://doi.org/10.4317/jced.58651>
13. Estivalet, M. S., de Araujo, L. P., Immich, F., da Silva, A. F., Ferreira, N. D. S., da Rosa, W. L. D. O., & Piva, E. (2022). Bioactivity potential of bioceramic-based root canal sealers: A scoping review. *Life*, 12(11), Article 1853. DOI: <https://doi.org/10.3390/life12111853>
14. Bernardini, C., Zamparini, F., Prati, C., Salaroli, R., Spinelli, A., Zannoni, A., & Gandolfi, M. G. (2024). Osteoinductive and regenerative potential of premixed calcium-silicate bioceramic sealers on vascular wall mesenchymal stem cells. *International endodontic journal*, 57(9), 1264–1278. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.14098>
15. Haji, T. H., Selivany, B. J., & Suliman, A. A. (2022). Sealing ability in vitro study and biocompatibility in vivo animal study of different bioceramic based sealers. *Clinical and experimental dental research*, 8(6), 1582–1590. DOI: <https://doi.org/10.1002/cre2.652>
16. Zaki, D. Y., Zaazou, M. H., Khallaf, M. E., & Hamdy, T. M. (2018). In vivo comparative evaluation of periapical healing in response to a calcium silicate and calcium hydroxide based endodontic sealers. *Open access macedonian journal of medical sciences*, 6(8), Article 1475. DOI: <https://doi.org/10.3889/oamjms.2018.293>

Конфлікт інтересів: автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2025

Стаття прийнята 10.10.2025

Статтю опубліковано 01.12.2025

