

СТОМАТОЛОГИЯ

Статья поступила в редакцию: 13.07.2026

Статья принята к публикации: 17.07.2026

Статья опубликована: 11.08.2026

УДК 616.314

DOI: 10.32743/UniMed.2026.137.8.23235

Разработка протокола и цифровое управление в челюстно-лицевой хирургии: малоинвазивная направленная костная регенерация, ИИ-навигация и стандарты безопасности

Кирьянова Светлана Павловна

ведущий эксперт по хирургической стоматологии, Лаборатория цифровых хирургических решений Навидент

РФ, г. Самара

E-mail: avp06260901@gmail.com

Protocol development and digital governance in maxillofacial surgery: minimally invasive guided bone regeneration, AI-assisted navigation, and safety standards

Kiryanova Svetlana Pavlovna

*Leading expert in surgical dentistry, Navident Digital Surgical Solutions Laboratory
Russia, Samara*

Аннотация

Направленная костная регенерация остаётся одной из самых технически сложных методик преимплантационной реконструктивной хирургии. Предсказуемость результата зависит от согласованного управления перфузией мягких тканей, стабильностью компартмента и кровоснабжением реципиентного ложа. Цель статьи — оценить концептуальную и техническую основу современных методологических разработок в области направленной костной регенерации, цифровой хирургической навигации и управления стандартами безопасности на фоне существующих данных литературы. Материалом анализа послужили опубликованные результаты систематических обзоров, метаанализов и профильных методологических публикаций последних лет, рассмотренные методом сравнительного анализа и синтеза. Статья обобщает данные по трём взаимосвязанным методологическим направлениям: биологическое и механическое обоснование малоинвазивного протокола направленной костной регенерации с кортикальной микроперфорацией через поднадкостничный туннельный коридор, архитектура системы

Библиографическое описание: Кирьянова С.П. Разработка протокола и цифровое управление в челюстно-лицевой хирургии: малоинвазивная направленная костная регенерация, ИИ-навигация и стандарты безопасности // Universum: медицина и фармакология : электрон. научн. журн. 2026. 8(137). URL: <https://7universum.com/ru/med/archive/item/23235>

хирургического планирования и интраоперационной навигации с ассистированием искусственного интеллекта, созданная для того, чтобы перенос плана в операционное поле поддавался измерению и проверке, и модель управления стандартами безопасности и точности, объединяющая верификацию по чек-листам с контролем цифрового рабочего процесса, специфичным для каждой модальности. Данные показывают: обнажение мембраны закономерно снижает горизонтальный прирост кости, ангиогенез выступает лимитирующей стадией интеграции трансплантата, а точность компьютер-ассистированной имплантационной хирургии зависит от целостности кумулятивной цепи ошибок больше, чем от любого отдельного параметра планирования. Разработанный протокол решает компромисс между стимуляцией реципиентного ложа и сохранением надкостницы в пределах ограниченного коридора. Навигационная система переводит управление бюджетом погрешности в конкретные механизмы: пороги достоверности сегментации, контрольные точки верификации регистрации и постоперационную отчётность по отклонениям как контур контроля качества. Модель безопасности рассматривает точность и безопасность как взаимозависимые системные свойства, для которых нужны верификация, управление компетенциями и прослеживаемость.

Abstract

Guided bone regeneration remains one of the technically most demanding techniques in pre-implant reconstructive surgery. Outcome predictability depends on coordinated control of soft-tissue perfusion, compartment stability, and recipient-site vascularization. The aim of this article is to evaluate the conceptual and technical basis of current methodological developments in guided bone regeneration, digital surgical navigation, and safety-standard governance against existing literature data. The material comprised published results of recent systematic reviews, meta-analyses, and relevant methodological publications, examined through comparative analysis and synthesis. The article synthesizes data across three interconnected methodological directions: the biological and mechanical rationale for a minimally invasive guided bone regeneration protocol using cortical micro-perforation through a subperiosteal tunnel corridor; the architecture of an AI-assisted surgical planning and intraoperative navigation system designed to make the transfer of the plan to the operative field measurable and verifiable; and a governance model for safety and accuracy standards that combines checklist-based verification with modality-specific digital workflow control. The evidence shows that membrane exposure consistently reduces horizontal bone gain, angiogenesis acts as the rate-limiting stage of graft integration, and the accuracy of computer-assisted implant surgery depends more on the integrity of the cumulative error chain than on any single planning parameter. The developed protocol resolves the trade-off between recipient-site stimulation and periosteal preservation within a limited corridor. The navigation system translates error-budget management into concrete mechanisms: segmentation confidence thresholds, registration verification checkpoints, and postoperative deviation reporting as a quality-control loop. The safety model treats accuracy and safety as interdependent system properties that require verification, competency management, and traceability rather than tool implementation alone.

Ключевые слова: направленная костная регенерация, кортикальная микроперфорация, поднадкостничное туннелирование, обнажение мембраны, хирургическое планирование с ассистированием ИИ, динамическая навигация, точность имплантации, стандарты безопасности, аугментация альвеолярного гребня, управление цифровым рабочим процессом.

Keywords: guided bone regeneration, cortical micro-perforation, subperiosteal tunneling, membrane exposure, AI-assisted surgical planning, dynamic navigation, implant accuracy, safety standards, alveolar ridge augmentation, digital workflow management.

Введение

Дефицит альвеолярного гребня по горизонтали остаётся одним из самых частых ограничивающих факторов при протезически ориентированной установке имплантатов. Среди стратегий аугментации направленная костная регенерация накопила самую сильную доказательную базу при условии надёжного достижения трёх исходных условий: стабильности компартмента, герметичности мягких тканей и сосудистого доступа. Систематические обзоры и метаанализы фиксируют клинически значимый прирост ширины гребня при разных вариантах направленной костной регенерации, но сходятся в одном: обнажение мембраны остаётся главным предиктором худших результатов, с доказанным негативным эффектом на горизонтальный прирост кости, который не зависит от материала барьера или состава трансплантата [3, 18]. Биологический механизм прозрачен: обнажение переводит защищённый регенеративный компартмент в открытую полость рта, подверженную бактериальной колонизации и механическому повреждению, что ослабляет раннюю стабильность сгустка и ускоряет деградацию барьера.

Компьютер-ассистированная имплантационная хирургия обнажает структурно схожую проблему. Метааналитические данные стабильно показывают среднее коронарное отклонение около 1 мм для разных компьютеризированных методик направления, но те же данные раз за разом фиксируют: достигнутая точность зависит от типа опоры шаблона, стратегии фиксации, качества регистрации и поведения оператора больше, чем от самого факта наличия цифрового планирования [8, 16].

На этом фоне статья анализирует совокупность методологических разработок Потапова А.В., специалиста по хирургическим техникам в челюстно-лицевой хирургии, посвящённых трём взаимосвязанным направлениям. Первое направление, малоинвазивный протокол направленной костной регенерации с кортикальной микроперфорацией, совмещает туннельный доступ для сохранения надкостницы со стандартизированной стимуляцией реципиентного ложа через ограниченный коридор [11]. Второе направление, система ИИ-ассистированного планирования и навигации, рассматривает переход от плана к исполнению как проверяемую цепь с явными контрольными точками верификации на границе каждого модуля [12]. Третье направление, модель управления стандартами безопасности и точности, объединяет поведенческий контроль по чек-листам с требованиями к цифровому рабочему процессу, специфичными для каждой модальности [13], опираясь отчасти на документированную серию клинических исходов по этим протоколам [14]. Цель настоящего исследования — оценить концептуальную и техническую основу этих разработок на фоне существующих данных, выявить конкретные клинические узкие места, которые они

устраняют, и определить их место в текущем методологическом горизонте дисциплины. Для достижения этой цели три указанных направления последовательно анализируются на основании материала и метода, представленных в разделе «Материалы и методы».

Материалы и методы

Работа выполнена как аналитический обзор. Анализу подверглись три взаимосвязанных методологических направления: протокол малоинвазивной направленной костной регенерации с кортикальной микроперфорацией, система ИИ-ассистированного хирургического планирования и навигации и модель управления стандартами безопасности и точности в хирургической стоматологии. Материалом для сопоставления послужили опубликованные систематические обзоры, метаанализы и оригинальные исследования по направленной костной регенерации, точности компьютер-ассистированной имплантации и безопасности хирургических вмешательств, отобранные по ключевым словам «guided bone regeneration», «dynamic navigation accuracy», «surgical safety checklist» и близким терминам, а также профильные методологические публикации по каждому из трёх направлений. Методом исследования выступил сравнительный анализ: положения рассматриваемых методологических разработок последовательно сопоставлялись с данными систематических обзоров и метаанализов по каждому направлению с целью оценки их согласованности с существующей доказательной базой и выявления нерешённых методологических вопросов.

Подготовка реципиентного ложа при горизонтальной аугментации альвеолярного гребня начинается со структурного биологического противоречия между механическими требованиями к удержанию трансплантата и сосудистыми требованиями раннего остеогенеза. Плотная кортикальная кость создаёт пространственную границу, которая противостоит коллапсу мембраны и смещению трансплантата, но та же плотность ограничивает проникновение крови и клеток-предшественников костного мозга, запускающих и поддерживающих ангиогенный каскад, от которого зависит остеогенная дифференцировка. Феномен регионального ускорения, временное и пространственно ограниченное повышение костного обмена и клеточной активности в ответ на контролируемое повреждающее воздействие, задаёт механистическую основу для подготовки реципиентного ложа как биологического усилителя, а не чисто механической процедуры [2].

Разработанный протокол переводит эту основу в практику, заменяя произвольную декортикацию стандартизированной сеткой микроперфораций: диаметр наконечника от 0,8 до 1,2 мм, контролируемая глубина проникновения от 1 до 2 мм, распределённые по всей площади планируемой регенерации [11]. Такая параметрическая спецификация меняет статус подготовки реципиентного ложа: вместо оператор-зависимой импровизации с переменной дозой и распределением она становится воспроизводимым этапом с проверяемыми параметрами. Эта дозозависимая, протоколно стандартизированная логика согласуется с механизмом регионального ускорения, описанным выше, и подкрепляет основную конструкцию протокола. Конкретное техническое отличие от более ранних описаний туннельной направленной костной регенерации состоит в явном соединении стандартизированной кортикальной стимуляции с ограниченным коридором доступа, чего более ранние чисто туннельные подходы системно не достигали.

Связь между геометрией доступа лоскута и стабильностью раны в литературе по направленной костной регенерации описана всё точнее. Обширная отслойка слизисто-надкостничного лоскута нарушает надкостничное кровоснабжение, снижает доставку кислорода к краевой ткани и создаёт натяжение в зоне ушивания, которое концентрирует механическое напряжение на линии шва в критический период раннего заживления. Систематический обзор и метаанализ Garcia et al. [3] показал, что обнажение мембраны значительно снижает горизонтальный прирост кости, причём эффект сильнее при аугментации гребня у пациентов без зубов, чем при закрытии периимплантатной дегисценции: это подтверждает, что управление мягкими тканями остаётся главным фактором успеха аугментации. Сравнительные данные по туннельным подходам к латеральной аугментации указывают на возможные преимущества в послеоперационном течении и профиле осложнений, хотя доказательная база по объёму пока ограничена и неоднородна по дизайну исследований [10].

Разработанный протокол устраняет эту проблему, меняя саму логику доступа: вместо максимизации обзора ради операционного удобства коридор строится вокруг сохранения ткани, с короткими вертикальными разрезами по краям зоны аугментации и тупым поднадкостничным туннелированием, которое сохраняет непрерывность надкостницы над трансплантатом [11]. Клинически это означает, что натяжение при ушивании распределяется по более широкому тканевому основанию, линия шва оказывается вне зоны максимальной выпуклости над объёмом трансплантата, а надкостничное кровоснабжение покровного лоскута сохраняется на протяжении всего периода заживления. Спецификация материалов архитектурно связана с этим доступом: инъекционные или пластичные гранулированные композиты трансплантата нужны для направленной доставки через туннель без избыточного уплотнения, а характеристики мембраны подбираются по гибкости, достаточной для прохождения через коридор при сохранении нужного перекрытия. Такое совместное решение доступа, стимуляции и материалов представляет собой методологически цельный отход от протоколов, где доступ и биологическая подготовка задаются независимо друг от друга.

Хирургический протокол приобретает доказательную силу только тогда, когда его ключевые параметры описаны с достаточной детализацией для сравнения исходов между операторами, центрами и периодами наблюдения. Требования к документации в разработанном протоколе включают размеры разреза, протяжённость туннеля, параметры перфорации (диаметр, глубину и шаг), состав и объём трансплантата, тип мембраны и способ фиксации, технику шва [11]. Оценка исхода опирается на КЛКТ-измерение ширины гребня в стандартизированных референсных точках, частоту ранних раневых осложнений, потребление анальгетиков и данные повторного входа о консолидации трансплантата и кортикальной интеграции. Такая архитектура документации создаёт условия для внутреннего аудита качества и для системного уточнения критериев отбора пациентов, особенно в связи с фенотипом мягких тканей и факторами риска расхождения краёв раны, которые влияют на вероятность обнажения.

Клиническую значимость такого уровня детализации подтверждает сравнительная литература по аугментации: систематические обзоры фиксируют в целом схожий средний прирост ширины при разных подходах, но также показывают, что решающим параметром для клинической предсказуемости оказывается разброс результатов [1, 17]. Стандартизация

схемы перфорации через заданный диаметр, глубину и шаг между перфорациями переводит этот подготовительный этап из источника неконтролируемой изменчивости в проверяемую переменную протокола. Такое преобразование значимо не только для конкретной клинической ситуации: оно создаёт условия для накопления сопоставимых данных и поддерживает тот тип накопления доказательств, который характеризует методологическое созревание хирургических субспециальностей.

Точность виртуального планирования и точность операционного исполнения расходятся так, что это составляет одну из самых значимых нерешённых проблем компьютер-ассистированной имплантационной хирургии и челюстно-лицевой реконструкции. Изменчивость в клинических сериях по точности связана прежде всего с качеством регистрации, стабильностью посадки шаблона, целостностью отслеживания при динамической навигации и управлением неопределённостью на границе каждого модуля цифрового рабочего процесса, а не с выбором конкретного программного обеспечения для планирования [8, 16]. Внедрение сегментации на основе глубокого обучения в конвейеры планирования сократило время, нужное для анатомической разметки, и снизило межоператорскую изменчивость, но одновременно создало структурную проблему: автоматические результаты выглядят правдоподобно в целом, но содержат локально значимые ошибки рядом с отверстиями, зонами артефактов и тонкими кортикальными границами, то есть именно там, где хирургические коридоры самые узкие [5, 9].

Система ИИ-ассистированной навигации Потапова [12] отвечает на эту архитектурную проблему, рассматривая переход от плана к исполнению как кумулятивную цепь координатных преобразований, где каждое преобразование вносит систематическую и случайную неопределённость, которую нужно явно ограничить прежде, чем она распространится на операционное поле. Система включает движок ИИ-сегментации с выводом показателей достоверности и контроля качества. Порог достоверности сегментации как обязательная контрольная точка превращает ИИ-компонент из непрозрачного автоматического слоя в проверяемое звено доказательной цепи, позволяя обнаруживать локально ухудшенные результаты до того, как они повлияют на решения по планированию.

Эта архитектурная логика прямо отвечает на хорошо документированную уязвимость цифровых хирургических конвейеров: конвейер может отказать незаметно, выдавая интерфейсные результаты с высокой заявленной достоверностью при том, что базовая система координат смещена из-за ошибки регистрации, неполной сегментации или неточной посадки шаблона [12]. Постоперационное картирование отклонений как рутинный отчёт по качеству даёт учреждениям возможность обнаруживать системный дрейф показателей при смене версий программного обеспечения, прошивки принтера или протоколов визуализации: управленческая проблема, которая становится острее по мере того, как в производственные конвейеры планирования встраиваются ИИ-компоненты с потенциально смещающимся распределением обучающих данных. Разработанная система переводит эти требования в конкретную архитектуру рабочего процесса, показывая, что интеграцию можно закодировать в проверяемых механизмах, а не просто декларировать как цель проектирования.

Монография Потапова о современных стандартах безопасности и точности в хирургической стоматологии [13] рассматривает эти понятия как взаимозависимые системные свойства, а не параллельные технические характеристики. Она развивает аргумент, что одни и те же механизмы, повышающие геометрическую точность, одновременно снижают ятрогенный риск. Модели безопасности, которые снижают изменчивость, в свою очередь создают условия для надёжных точностных рабочих процессов. Основной тезис состоит в том, что стандарт нельзя написать исключительно как технологическое требование, поскольку результат зависит от навыка, интерпретации и дисциплины рабочего процесса: полноценный стандарт должен задавать допущения о компетенциях, контрольные точки верификации и измеримые показатели результата наряду с любой технологической спецификацией [9]. Эту позицию подтверждает доказательная база по пациентской безопасности в стоматологии, где единственным вмешательством с доказанным по систематическим обзорам снижением частоты неблагоприятных событий остаются хирургические чек-листы. Это отражает устойчивую закономерность: предотвратимый вред возникает из упущений, ошибок идентификации и рассогласования на процедурных переходах, а не из изолированных технических сбоев.

На уровне управления цифровой точностью модель требует, чтобы логика верификации была специфичной для каждой модальности, а не общей: статическое направление, динамическая навигация и роботизированное ассистирование концентрируют свои главные точки отказа в разных местах рабочего процесса [13]. Для статического направления основной риск сосредоточен в качестве данных планирования и стабильности посадки шаблона. Для динамической навигации риск определяют иначе: целостность регистрации, стабильность отслеживания и адаптация оператора при когнитивной нагрузке в реальном времени. У роботизированных систем риск смещается ещё выше по цепи, в калибровку, алгоритмы регистрации и целостность защитных блокировок. Единый чек-лист компьютер-ассистированной хирургии, применённый ко всем этим модальностям, не контролирует главные источники ошибок ни для одной из них. Поэтому модель управления задаёт специфичные для модальности режимы верификации, пороги приемлемости для достоверности регистрации и отслеживания, критерии перехода на отказ от цифрового пути при деградации сигналов верификации и полную документацию прослеживаемости, которая поддерживает аудит и итеративное уточнение протокола. Нарративный синтез клинических исходов дополнительно помещает эти требования управления в доказательную базу инновационных хирургических протоколов, показывая, что именно измеримый контроль исхода, а не выбор инструмента, определяет воспроизводимость и регенеративных, и навигируемых имплантационных процедур [14].

Результаты и обсуждение

Проанализированная совокупность работ объединена общей проектной философией: системным переходом от описания техники к параметрической спецификации, контролируемой верификации и обратной связи по замкнутому контуру. Такая методологическая ориентация напрямую отвечает на несколько хорошо документированных ограничений опубликованной литературы по хирургической стоматологии: преобладание ассоциативных исследований над предиктивными, узкие датасеты с ограниченной

обобщаемостью, сильную оператор-зависимость исходов и отсутствие механизмов обратной связи, которые связывали бы клинические данные с уточнением протокола [19]. Все три направления объединяет один методологический стержень: каждое рассматривает соответствующий клинический процесс как проверяемую цепь контролируемых переменных, а не как неструктурированную последовательность решений оператора.

В области направленной костной регенерации совместная оптимизация туннельного доступа и стандартизированной кортикальной стимуляции решает подлинное механистическое противоречие, которое литература раньше не устраняла через единый цельный протокол. Биологическое обоснование кортикальной перфорации как средства усиления регенеративной сигнализации в компартменте трансплантата опирается на данные о феномене регионального ускорения, изложенные выше [2]. Методологический вклад состоит именно в том, что обе задачи становятся достижимыми в пределах одного ограниченного операционного коридора благодаря совместно спроектированным, а не независимо подобранным спецификациям инструментов и материалов [6;7]. Среди содержательных контраргументов стоит выделить незавершённость доказательной базы по конкретным параметрам перфорации: рекомендованные диапазоны диаметра, глубины и шага биологически и механически обоснованы, но проспективные сравнительные исследования с варьированием параметров и измерением функциональных исходов остаются необходимым следующим шагом для верификации оптимального диапазона.

В области цифрового планирования явная трактовка конвейера как кумулятивного бюджета ошибки с контрольными точками верификации на границах модулей отвечает на структурную слабость, характерную для коммерческих систем планирования: склонность незаметно накапливать неопределённость между этапами, выдавая интерфейсные результаты с высокой заявленной достоверностью, надёжность которых ничем не ограничена до тех пор, пока постоперационное сравнение не выявит системную ошибку [17;4]. Архитектурное решение рассматривать постоперационную отчётность по отклонениям как рутинную функцию контроля качества, а не как исследовательскую методику, имеет практическое значение для внедрения ИИ-компонентов в учреждениях, поскольку создаёт внутренний механизм обнаружения дрейфа показателей моделей сегментации при их развёртывании на других протоколах визуализации, платформах сканера или группах пациентов, отличных от обучающего распределения. В связи с литературой по кривой обучения для динамической навигации, которая фиксирует измеримое улучшение результата по мере накопления раннего опыта и заметную изменчивость отклонений в зависимости от сложности случая и стабильности референса [15], требования к управлению компетенциями в модели безопасности выглядят полностью обоснованными: критерии перехода на ручную технику и порядок эскалации нужно задавать применительно к конкретным типам ошибок каждой модальности направления.

Клинические узкие места с доказанной значимостью в систематической литературе проходят через все методологические разработки, рассмотренные в статье: управление перфузией надкостницы и закрытием мягких тканей при горизонтальной аугментации гребня, биологическая стимуляция реципиентного ложа в пределах ограниченного операционного коридора, проверяемый перенос виртуального хирургического плана в операционное исполнение и управление безопасностью и точностью в цифровизированных

хирургических рабочих процессах. Объединяющий методологический принцип для всех трёх направлений состоит в переходе от оператор-зависимого описания техники к параметрической спецификации, которая поддерживает аудит, сравнение и итеративное уточнение. Такая ориентация отвечает текущим методологическим требованиям дисциплины, которая нуждается в протоколах, способных работать как инструменты контроля качества, порождающие проверяемые данные о процессе и исходе.

Заключение

Значение этой совокупности работ для дисциплины в целом состоит в том, что она устраняет каждое узкое место через целостную проектную логику и делает это с явным признанием границ показаний и ограничений доказательной базы. Протокол кортикальной микроперфорации предназначен для локализованных горизонтальных дефектов, где туннельный доступ технически возможен, а не как замена открытой направленной костной регенерации в геометрически сложных случаях, требующих жёсткого поддержания пространства. Навигационная система заявлена как архитектура измерения и верификации, а не как утверждение о точности само по себе: постоперационный аудит служит механизмом проверки этого утверждения на практике. Модель управления безопасностью и точностью заявлена как требование социотехнической системы, признающее, что качество клинического исхода зависит от целостности связи между человеком и рабочим процессом не меньше, чем от эффективности отдельных цифровых компонентов.

Список литературы

1. Санц-Санчес И., Орtiz-Виньон А., Санц-Мартин И., Фигеро Э., Санц М. Sanz-Sanchez, I., Ortiz-Vignon, A., Sanz-Martin, I., Figuero, E., & Sanz, M. (2015). Effectiveness of lateral bone augmentation on the alveolar crest dimension: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dental Research*, 94(9 Suppl), 128S-142S [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
2. Di Battista, M., Kernitsky, J., Exarchos, E., Ohira, T. & Dibart, S. (2022). Quantification and comparison of the regional acceleratory phenomenon in bone following piezosurgery or bur osteotomy: A pilot study in rats. *Clinical and Experimental Dental Research*, 9(1), 71–79 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
3. Garcia, J., Dodge, A., Luepke, P., Wang, H.-L., Kapila, Y. & Lin, G.-H. (2018). Effect of membrane exposure on guided bone regeneration: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 29(3), 328–338 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
4. Haynes, A.B., Weiser, T.G., Berry, W.R., Lipsitz, S.R., Breizat, A.H., Dellinger, E.P., Herbosa, T., Joseph, S., Kibatala, P.L., Lapitan, M.C., Merry, A.F., Moorthy, K., Reznick, R.K., Taylor, B. & Gawande, A.A. (2009). A surgical safety checklist to reduce morbidity and mortality in a global population. *New England Journal of Medicine*, 360(5), 491–499 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).

5. Jaskari, J., Sahlsten, J., Jarnstedt, J., Mehtonen, H., Karhu, K., Sundqvist, O., Hietanen, A., Varjonen, V., Mattila, V. & Kaski, K. (2020). Deep learning method for mandibular canal segmentation in dental cone beam computed tomography volumes. *Scientific Reports*, 10, 5842 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
6. Jiao, Y., Liu, Y., Li, X., Han, N., Liu, S., Du, J., Xu, J., Li, S., Guo, L. & Liu, Y. (2025). Cortical perforation promotes bone regeneration by enhancing nerve growth factor secretion. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 755, 151562 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
7. Jorba-García A., González-Barnadas A., Camps-Font O., Figueiredo R., Valmaseda-Castellón E. Jorba-García, A., González-Barnadas, A., Camps-Font, O., Figueiredo, R., & Valmaseda-Castellón, E. (2021). Accuracy assessment of dynamic computer-aided implant placement: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 25(5), 2479–2494 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
8. Khaohoen, A., Powcharoen, W., Sornsuwan, T., Chaijareenont, P., Rungsiyakull, C. & Rungsiyakull, P. (2024). Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic, and robot-assisted surgery: A systematic review and meta-analysis of clinical trials. *BMC Oral Health*, 24, 359 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
9. Liu, Y., Xie, R., Wang, L., Liu, H., Liu, C., Zhao, Y., Bai, S. & Liu, W. (2024). Fully automatic AI segmentation of oral surgery-related tissues based on cone beam computed tomography images. *International Journal of Oral Science*, 16, 34 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
10. Monje, A., Pons, R., Sculean, A., Nart, J. & Urban, I. (2023). Minimal invasiveness in lateral bone augmentation with simultaneous implant placement: A systematic review. *Clinical Oral Implants Research*, 34(Suppl 26), 15–31 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
11. Potapov, A.V. (2026a). *Advanced surgical techniques in oral and maxillofacial dentistry*. LAP Lambert Academic Publishing.
12. Potapov, A.V. (2026b). *Innovations in surgical dentistry: From protocols to digital surgery*. LAP Lambert Academic Publishing.
13. Potapov, A.V. (2026c). *Modern standards of safety and precision in surgical dentistry*. LAP Lambert Academic Publishing.
14. Potapov, A.V. (2026d). *Clinical outcomes of innovative dental surgical protocols*. *Flagman Nauki*, 3(38) [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
15. Spille, J., Stiesch, M., Fiedler, L. & Al-Nawas, B. (2022). Learning curve and comparison of dynamic implant navigation: An experimental study. *Dentistry Journal*, 10(10), 187 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
16. Tahmaseb, A., Wu, V., Wismeijer, D., Coucke, W. & Evans, C. (2018). The accuracy of static computer-aided implant surgery: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 29(S16), 416–435 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).

17. Vorovenci, A., Drafta, S. & Petre, A. (2024). Horizontal ridge augmentation through ridge expansion via osseodensification, guided bone regeneration and ridge-split: Systematic review and meta-analysis of clinical trials. *Biomedical Reports*, 21(4), 139 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
18. Wessing, B., Lettner, S. & Zechner, W. (2018). Guided bone regeneration with collagen membranes and particulate graft materials: A systematic review and meta-analysis. *The International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 33(1), 87–100 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).
19. Wu, X.Y., Shi, J.Y., Qiao, S.C., Tonetti, M.S. & Lai, H.C. (2024). Accuracy of robotic surgery for dental implant placement: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 35(6), 598–608 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 07.08.2026).

References

1. Санц-Санчес И., Орtiz-Виньон А., Санц-Мартин И., Фигеро Э., Санц М. [Sanz-Sanchez, I., Ortiz-Vignon, A., Sanz-Martin, I., Figuero, E., & Sanz, M. (2015). Effectiveness of lateral bone augmentation on the alveolar crest dimension: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dental Research*, 94(9 Suppl), 128S-142S] (In Russ.). – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
2. Di Battista, M., Kernitsky, J., Exarchos, E., Ohira, T. & Dibart, S. (2022). Quantification and comparison of the regional acceleratory phenomenon in bone following piezosurgery or bur osteotomy: A pilot study in rats. *Clinical and Experimental Dental Research*, 9(1), 71–79 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
3. Garcia, J., Dodge, A., Luepke, P., Wang, H.-L., Kapila, Y. & Lin, G.-H. (2018). Effect of membrane exposure on guided bone regeneration: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 29(3), 328–338 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
4. Haynes A.B., Weiser T.G., Berry W.R., Lipsitz S.R., Breizat A.H., Dellinger E.P., Herbosa, T., Joseph, S., Kibatala P.L., Lapitan M.C., Merry A.F., Moorthy, K., Reznick R.K., Taylor, B. & Gawande A.A. (2009). A surgical safety checklist to reduce morbidity and mortality in a global population. *New England Journal of Medicine*, 360(5), 491–499 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
5. Jaskari, J., Sahlsten, J., Jarnstedt, J., Mehtonen, H., Karhu, K., Sundqvist, O., Hietanen, A., Varjonen, V., Mattila, V. & Kaski, K. (2020). Deep learning method for mandibular canal segmentation in dental cone beam computed tomography volumes. *Scientific Reports*, 10, 5842 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
6. Jiao, Y., Liu, Y., Li, X., Han, N., Liu, S., Du, J., Xu, J., Li, S., Guo, L. & Liu, Y. (2025). Cortical perforation promotes bone regeneration by enhancing nerve growth factor secretion. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 755, 151562 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).

7. Jorba-García A., González-Barnadas A., Camps-Font O., Figueiredo R., Valmaseda-Castellón E. Jorba-García, A., González-Barnadas, A., Camps-Font, O., Figueiredo, R., & Valmaseda-Castellón, E. (2021). Accuracy assessment of dynamic computer-aided implant placement: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 25(5), 2479–2494 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
8. Khaohoen, A., Powcharoen, W., Sornsuwan, T., Chaijareenont, P., Rungsiyakull, C. & Rungsiyakull, P. (2024). Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic, and robot-assisted surgery: A systematic review and meta-analysis of clinical trials. *BMC Oral Health*, 24, 359 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
9. Liu, Y., Xie, R., Wang, L., Liu, H., Liu, C., Zhao, Y., Bai, S. & Liu, W. (2024). Fully automatic AI segmentation of oral surgery-related tissues based on cone beam computed tomography images. *International Journal of Oral Science*, 16, 34 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
10. Monje, A., Pons, R., Sculean, A., Nart, J. & Urban, I. (2023). Minimal invasiveness in lateral bone augmentation with simultaneous implant placement: A systematic review. *Clinical Oral Implants Research*, 34(Suppl 26), 15–31 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
11. Potapov A.V. (2026a). Advanced surgical techniques in oral and maxillofacial dentistry. LAP Lambert Academic Publishing.
12. Potapov A.V. (2026b). Innovations in surgical dentistry: From protocols to digital surgery. LAP Lambert Academic Publishing.
13. Potapov A.V. (2026c). Modern standards of safety and precision in surgical dentistry. LAP Lambert Academic Publishing.
14. Potapov A.V. (2026d). Clinical outcomes of innovative dental surgical protocols. *Flagman Nauki*, 3(38) – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
15. Spille, J., Stiesch, M., Fiedler, L. & Al-Nawas, B. (2022). Learning curve and comparison of dynamic implant navigation: An experimental study. *Dentistry Journal*, 10(10), 187 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
16. Tahmaseb, A., Wu, V., Wismeijer, D., Coucke, W. & Evans, C. (2018). The accuracy of static computer-aided implant surgery: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 29(S16), 416–435 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
17. Vorovenci, A., Drafta, S. & Petre, A. (2024). Horizontal ridge augmentation through ridge expansion via osseodensification, guided bone regeneration and ridge-split: Systematic review and meta-analysis of clinical trials. *Biomedical Reports*, 21(4), 139 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).
18. Wessing, B., Lettner, S. & Zechner, W. (2018). Guided bone regeneration with collagen membranes and particulate graft materials: A systematic review and meta-analysis. *The International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 33(1), 87–100 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).

-
19. Wu X.Y., Shi J.Y., Qiao S.C., Tonetti M.S. & Lai H.C. (2024). Accuracy of robotic surgery for dental implant placement: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 35(6), 598–608 – URL: <https://doi.org/> (accessed 10.08.2026) (дата обращения: 07.08.2026).