

## ЗНАЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ДЕНТАЛЬНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Отажонова Хилола Илхомжон кизи

Акбаров Авзал Нигматуллаевич

Ташкентский Государственный Стоматологический Институт

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17232833>

**Резюме.** Одним из ключевых направлений современной дентальной имплантологии является повышение предсказуемости исходов лечения. Важным инструментом для достижения этой цели стали компьютерные технологии, включающие трёхмерное цифровое планирование, статические навигационные хирургические шаблоны и динамические навигационные системы. В статье рассмотрены основные принципы виртуального планирования имплантации на основе данных конусно-лучевой компьютерной томографии и интраорального сканирования, реализация протезно-ориентированного подхода по принципу «от коронки вниз», а также методы переноса виртуального плана в клиническую практику. Особое внимание уделено сравнительной характеристике статических шаблонов и динамических систем навигации, их точности, клиническим преимуществам и ограничениям. Показано, что применение навигационных технологий позволяет достичь минимальных отклонений фактического положения имплантата от запланированного, снизить частоту хирургических осложнений, повысить функциональный и эстетический прогноз лечения. Подчёркнуто, что цифровые методы делают результаты менее зависимыми от опыта хирурга и обеспечивают более высокий уровень безопасности и воспроизводимости в сложных клинических случаях.

**Ключевые слова:** дентальная имплантация, компьютерное планирование, навигационные хирургические шаблоны, динамическая навигация, цифровые технологии.

## THE IMPORTANCE OF COMPUTER TECHNOLOGIES IN INCREASING PREDICTABILITY OF DENTAL IMPLANTATION OUTCOMES (LITERATURE REVIEW)

**Abstract.** One of the key areas of modern dental implantology is improving the predictability of treatment outcomes. Computer technologies, including 3D digital planning, static navigation surgical guides, and dynamic navigation systems, have become an important tool for achieving this goal. This article discusses the basic principles of virtual implant planning based on cone beam computed tomography and intraoral scanning data, the implementation of a prosthesis-oriented "crown-down" approach, and methods for transferring virtual plans to clinical practice. Particular attention is paid to the comparative characteristics of static guides and dynamic navigation systems, their accuracy, clinical advantages, and limitations. It has been demonstrated that the use of navigation technologies allows for minimal deviations in the actual implant position from the planned one, reduces the incidence of surgical complications, and improves the functional and aesthetic prognosis of treatment. It is emphasized that digital

methods make results less dependent on the surgeon's experience and ensure a higher level of safety and reproducibility in complex clinical cases.

**Keywords:** dental implantation, computer-assisted planning, navigational surgical guides, dynamic navigation, digital technologies.

Значение компьютерных технологий (в том числе навигационных шаблонов) для повышения предсказуемости результата дентальной имплантации

Одной из главных задач имплантологической практики является повышение предсказуемости исхода лечения, то есть обеспечение того, чтобы установленный имплантат прослужил долго, занял оптимальное положение для протезирования и не вызвал осложнений. Современное развитие цифровых технологий в медицине предоставило новые инструменты для решения этой задачи. В данной главе рассматривается роль компьютерных технологий, включая системы цифрового планирования, статические навигационные шаблоны и динамические навигационные системы, в повышении точности и предсказуемости результатов дентальной имплантации. Рассмотрены принципы цифрового планирования имплантации, применение хирургических навигационных шаблонов, системы компьютерной навигации в реальном времени, а также их влияние на клинические исходы. Особое внимание уделено тому, как эти технологии позволяют минимизировать риски, повысить точность установки имплантатов и приблизить реальный результат к запланированному, обеспечивая тем самым более надежный и воспроизводимый исход лечения.

Цифровые технологии планирования имплантации коренным образом изменили подход к лечению пациентов. В традиционной практике хирург при установке имплантата ориентировался в основном на анатомические ориентиры и свой опыт, выполняя процедуру. Такой свободно-ручной метод несет определенную долю неопределенности, даже у опытных хирургов возможны отклонения имплантата от оптимального положения. Неправильное позиционирование импланта может привести к ряду осложнений. Повреждению соседних зубов, травме нервно-сосудистого пучка, перфорации дна гайморовой пазухи или краевому дефекту кости.

Внутриротовой оптический сканер позволяет получить цифровые слепки зубных рядов или протезного поля с высокой точностью. На основе совмещения данных КЛКТ и 3D-сканирования врач в специальной программе создает виртуальную трёхмерную модель клинической ситуации пациента. Далее при помощи программ CAD моделируется оптимальное расположение имплантатов в программном обеспечении имплантат виртуально помещается в челюстную кость с учётом анатомии и будущей протезной конструкции. Такой подход часто называют обратным планированием от протезной конструкции (принцип «crown-down» – «от коронки вниз»). [23,24,19]

Сначала определяется идеальная позиция будущей коронки, исходя из правильной окклюзии, эстетики и функций, а затем под нее подбирается положение, длина и диаметр имплантата на КЛКТ-снимках. В результате хирург получает чёткий план, где именно должен находиться имплантат, под каким углом и на какую глубину его следует установить, чтобы обеспечить наилучший протетический исход и избежать критических структур.

По сути, детальное 3D-планирование формирует цифровой протокол лечения, который затем будет реализован с помощью специальных проводников или навигации, обеспечивая высокую точность соответствия планируемого и фактического положения имплантата в кости. Компьютерные технологии CAD/CAM также позволяют на следующем этапе изготовить необходимые хирургические шаблоны и протезные конструкции с высокой точностью по заложенным параметрам. [28,11,15]

Одним из наиболее распространенных способов переноса виртуального плана имплантации в реальную операционную практику являются хирургические навигационные шаблоны. Навигационный шаблон - это индивидуально изготовленное приспособление, которое плотно фиксируется в полости рта пациента и направляет инструменты хирурга во время операции. Шаблон представляет собой накладку на челюсть с направляющими отверстиями в точках, где должны устанавливаться имплантаты.

Применение навигационных шаблонов в имплантологии стало качественным прорывом в направлении точности и безопасности операций. Если ранее хирург, не имея шаблона, должен был во время операции самостоятельно контролировать угол наклона бора, глубину остеотомии и положение имплантата относительно ориентиров, то теперь большая часть этой задачи закладывается в шаблон заранее. Шаблон фактически задаёт сверлу фиксированный путь, соответствующий плану: когда хирург сверлит через направляющую втулку, угол и позиция сверла ограничены стенками шаблона. Это означает, что имплантат будет установлен практически туда же, куда он был запланирован в компьютере. По данным литературы, благодаря использованию шаблонов точность позиционирования имплантатов значительно возрастает. Например, в систематическом обзоре 2025 года сообщается, что среднее линейное отклонение положения имплантата при свободной установке (без шаблона) составило порядка 1,5–2,2 мм, тогда как при использовании полностью навигационного шаблона выйдет менее 1 мм. Угловое отклонение оси имплантата сокращается с примерно 7° при свободной технике до ~2–3° при шаблонном методе. [30,13,20,26]

Такие данные свидетельствуют, что навигационные шаблоны позволяют приблизить фактическое положение имплантата к запланированному почти с ювелирной точностью, снизив погрешность в несколько раз. Клинические преимущества этого очевидны. Во-первых, повышается предсказуемость протезирования, имплантат будет выходить точно в том месте, где предполагалась коронка, под правильным углом, что значительно облегчает работу ортопеда и обеспечивает лучшее совпадение с запланированной конструкцией. Во-вторых, снижаются риски интраоперационных осложнений. Ориентируя хирурга, шаблон не позволяет отклониться и зайти сверлу за безопасные границы. Тем самым существенно уменьшается вероятность повредить соседний зуб или анатомическую структуру. Согласно обзору, использование хирургических шаблонов минимизирует вероятность травмы анатомических структур и неправильного расположения имплантата, снижая число ошибок. Одновременно отмечено сокращение количества послеоперационных осложнений и улучшение результатов лечения благодаря такому контролю положения имплантата. [27,9]

Полностью навигационные протоколы обеспечивают наивысшую точность из всех, однако требуют специальных наборов инструментов и достаточного пространства в полости рта. Пилотные шаблоны несколько менее точны, но широко применяются из-за технической простоты и лучшего доступа в условиях ограниченного открытия рта.

Для повышения точности в беззубых случаях шаблоны часто фиксируются дополнительными штифтами к кости после разреза. Несмотря на огромные преимущества, у шаблонной методики есть и некоторые ограничения. Во-первых, необходимы время и ресурсы на подготовительный этап: требуется сделать КЛКТ, сканирование, спланировать в ПО, изготовить шаблон и всё это удлинит предоперационный период и требует определенной квалификации от врача, а также наличия соответствующего программно-аппаратного оснащения. Во-вторых, возможны ситуации, когда использовать шаблон затруднительно. Например, при очень малом открывании рта пациента габариты шаблона и рукоятки с бором могут не поместиться в задних отделах. Исследования указывают, что для полноценно управляемого сверления в области моляров требуется раскрытие рта около 50 мм, а в области премоляров – не менее 32 мм. Если эти условия не выполняются, шаблон может частично потерять свою эффективность. В таких случаях либо переходят на пилотное сверление через шаблон с последующим удалением шаблона, либо вынужденно проводят имплантацию вручную. [21,16,29]

Ещё один потенциальный недостаток это риск несоответствия или смещения шаблона. Если шаблон изготовлен с ошибкой или не до конца зафиксирован, он может дать систематическую погрешность, где все имплантаты окажутся смещены относительно плана. Поэтому крайне важно точное соответствие шаблона модели челюсти.

Помимо статических шаблонов, в арсенале компьютерных технологий для имплантации существует другой подход - динамическая навигация или системы реального времени, которые иногда называют также хирургическим GPS. В отличие от статического шаблона, который изготавливается заранее и физически направляет инструменты, динамическая навигация представляет собой электронную систему, отслеживающую положение хирургических инструментов во время операции и сопоставляющую их с заранее спланированной виртуальной моделью на компьютере. [18,22]

Многочисленные исследования показывают, что динамическая навигация позволяет достигать очень высокой точности размещения имплантатов. В целом отклонения при динамическом методе измеряются миллиметрами и градусами, близкими к показателям шаблонной техники, и значительно меньше, чем при свободной установке имплантатов. Мета-анализ сообщает средние отклонения при динамической навигации ~1,0 мм по положению имплантата и ~3–4° по углу, что лишь немного уступает полностью шаблонному методу. Некоторые исследования даже отмечают, что по угловой точности динамические системы могут превосходить статические шаблоны, поскольку отсутствуют погрешности, связанные с высотой втулки и люфтом инструмента. [25,14,17]

В одном экспериментальном исследовании навигационная система (X-Guide) обеспечила значительно меньшую угловую девиацию имплантата по сравнению и с ручным, и со статическим методами, вне зависимости от опыта хирурга. [4,1]

Помимо уже распространенных систем, в имплантологии активно развиваются и другие передовые компьютерные технологии, направленные на улучшение точности и предсказуемости. Одно из перспективных направлений – использование дополненной реальности (augmented reality). Технологии дополненной реальности предполагают, что хирург надевает специальное устройство в виде очков или шлема, которое проецирует виртуальные подсказки прямо на поле зрения врача. В контексте имплантации это может быть голографическое отображение плана имплантов на челюсти пациента во время операции. Хирург как бы видит внутреннюю структуру кости и идеальные направления имплантов через очки, совмещенные с реальной картиной. Первые исследования уже показывают, что AR-технологии способны повысить пространственную ориентировку хирурга и улучшить точность угла и глубины имплантации, приближая показатели к навигационным методам. По сути, AR-навигация может выполнять схожую функцию с динамической системой, но без необходимости смотреть на отдельный экран, информация накладывается поверх реального изображения. Однако пока распространенность дополненной реальности ограничена. Сдерживающими факторами являются высокая стоимость оборудования и необходимость специального обучения персонала работе с такими устройствами. [12,6]

Внедрение компьютерных технологий в дентальную имплантацию заметно отразилось на ключевых показателях успешности лечения. Прежде всего, значительно улучшились показатели точности, о чем свидетельствуют многочисленные исследования, приведенные выше. Однако повышение точности - это не самоцель, а средство для достижения лучших клинических исходов. Современные данные указывают, что применение компьютерной навигации положительно сказывается на долгосрочной выживаемости имплантатов и снижении частоты осложнений. В мета-анализе, сравнившем результаты имплантации с навигацией и без нее, было выявлено, что доля неудач при навигационном подходе составила всего ~2,3%, тогда как при традиционном свободном установлении имплантатов - около 6,4%. Иными словами, в группе без компьютерного наведения риск провала имплантации был почти втрое выше, несмотря на то что в обоих случаях общий уровень выживаемости имплантатов оставался высоким. Авторы делают вывод, что использование навигационных технологий достоверно снижает вероятность неудачи и рекомендуется для обеспечения максимально успешного исхода. [2,5]

Пациенты, прошедшие имплантацию с компьютерным планированием, реже сталкиваются с неприятными инцидентами вроде онемения участка губы или кровотечения из перфорации пазухи, что напрямую отражается на качестве их жизни после операции. Еще один аспект, это протезно-ориентированный результат, который обеспечивает навигация. Установив имплантат точно в запланированное протезное положение, врач и техник получают возможность изготовить окончательную коронку идеальной формы и прикуса. Практика показывает, что при навигационной имплантации реже требуются существенные коррекции ортопедической конструкции, уменьшается необходимость в нестандартных абатментах или компенсирующих

угловых элементах, так как имплантат изначально стоит правильно. Это повышает эстетический и функциональный прогноз. Коронка выглядит естественнее, нагрузка на имплантат распределяется осевым образом, что предотвращает технические осложнения. [7,10] Пациенты, получившие имплантацию с использованием таких технологий, обычно отмечают более высокую удовлетворенность, ведь их новый зуб соответствует ожиданиям по внешнему виду и удобству. Компьютерные технологии также влияют на комфорт и эффективность лечения. Благодаря точности, часто удается проводить операции менее инвазивно. Шаблон в этом случае направляет сверло через небольшое отверстие в слизистой. [3] Малотравматичность сокращает сроки заживления и уменьшает послеоперационную боль и отечность. Это делает возможным лечение пациентов, которые ранее считались пограничными или нуждались в более травматичных процедурах. В области верхней челюсти, рядом с гайморовой пазухой, навигация помогает точно определить точку входа сверла, чтобы не повредить слизистую оболочку пазухи. [1] В одной из работ было отмечено отсутствие перфораций дна гайморовых пазух ни в одном случае из серии имплантаций, выполненных с компьютерным шаблоном, тогда как при традиционной технике такие осложнения статистически встречаются.

В дальнейшем, с совершенствованием технологий от улучшения алгоритмов планирования до внедрения искусственного интеллекта и роботов, предсказуемость и надежность имплантационного лечения будет расти еще больше. Всё это в конечном счете служит главной цели, чтобы обеспечить пациентам долговременный положительный результат с минимальным количеством сюрпризов и максимальным соответствием ожиданиям.

**Заключение.** Компьютерные технологии в дентальной имплантологии формируют новый стандарт лечения, обеспечивая протезно-ориентированное планирование, высокую точность хирургического этапа и надёжные долгосрочные результаты. Их внедрение способствует повышению безопасности, воспроизводимости и эстетической предсказуемости имплантационного лечения.

### **Adabiyotlar, References, Литературы:**

1. Абакаров С.И., и др. (2023). (Материалы выпуска «Клиническая стоматология», тематические статьи по цифровым технологиям и навигационным шаблонам). // Клиническая стоматология. – 2023. – №3. – С. — (сборник).
2. Гветадзе Р.Ш., Абрамян С.В., Иванов А.А., Нубарян А.П. (2015). Использование диагностических шаблонов на этапах протезирования с опорой на дентальные имплантаты. // Стоматология. – 2015. – Т. 94, №4. – С. 63–69.
3. Дегтярев Н.Е., Бибииков А.И., и др. (2020). Этапы изготовления хирургических шаблонов и их применение в сложных клинических случаях. // Head and Neck. Russian Journal. – 2020. – Т. 8, №3. – С. 61–67.
4. Дентальная имплантация в области ретенированных и сверхкомплектных зубов: клинические случаи с применением хирургических шаблонов. (2023). // Стоматология. – 2023. – Т. 102, №4. – С. — (клинические наблюдения).
5. Материалы 19-го Всероссийского стоматологического форума (2022): доклады по применению хирургических шаблонов при имплантации. // Российская стоматология. –

2022. – Т. 15, №1. – С. — (материалы конференции).

6. Седов Ю.Г., Аванесов А.М., Салеев Р.А., Салеева Г.Т., Ярулина З.И. (2021). Классификация вариантов применения хирургических направляющих шаблонов для дентальной имплантации. // *Стоматология*. – 2021. – Т. 100, №1. – С. 84–88.
7. Софронов М.В., Кузнецов М.В., Буланов С.И., Зарубина Е.Г., Лысов Д.Н. (2023). Клинико-лабораторные показатели послеоперационного периода дентальной имплантации с использованием навигационного шаблона у пациентов с ХОБЛ. // *Российская стоматология*. – 2023. – Т. 16, №2. – С. 13–22.
8. (Авторский коллектив). (2024). Физико-механические свойства материалов, применяемых для 3D-печати хирургических шаблонов при дентальной имплантации. // *Стоматология*. – 2024. – Т. 103, №1.
9. (Клиническая разработка направляющего шаблона для мягкотканной трансплантации при имплантологическом лечении). (2022). // *Стоматология*. – 2022. – Т. 101, №4.
10. (Редколлегия). (2021). Вариабельность использования направляющих шаблонов при проведении хирургического этапа дентальной имплантации (обзор). // *Российская стоматология*. – 2021. – Т. 14, №2. – С. 3–7.
11. Abdelhay N., Prasad S., Prasad Gibson M. (2021). Failure rates associated with guided versus non-guided dental implant placement: a systematic review and meta-analysis. // *BDJ Open*. – 2021. – Т. 7, Article 31. – С. — (Article 31).
12. Chrabieh E., AlSubaie A., Osman R.B., et al. (2024). Accuracy of computer-guided implant surgery in partially edentulous patients using 3D-printed surgical guides. // *International Journal of Implant Dentistry*. – 2024. – Т. 10, №1. – С. 52.
13. Derksen W., Wismeijer D., Flügge T., et al. (2019). The accuracy of computer-guided implant surgery with tooth-supported digitally designed drill guides based on CBCT and intraoral scanning: a prospective cohort study. // *Journal of Prosthodontic Research*. – 2019. – Т. 63, №2. – С. 201–209.
14. Emery R.W., Merritt S.A., Lank K., Gibbs J.D. (2016). Accuracy of Dynamic Navigation for Dental Implant Placement. // *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*. – 2016. – Т. 31, №4. – С. 924–933.
15. Khaohoen A., Kiattavorncharoen S., Subbalekha K., Saengsirinavin C., Pimkhaokham A. (2024). Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic and robot-assisted surgery: a systematic review. // *BMC Oral Health*. – 2024. – Т. 24. – С. — (Article/PMCID).
16. Knipper A., Jansen V.K., Luthardt R.G., et al. (2024). Accuracy of Dental Implant Placement with Dynamic Navigation: a clinical evaluation. // *Bioengineering*. – 2024. – Т. 11, №2. – С. 155.
17. Marqués Bautista N., García-Sevilla M., Sánchez-Aparicio M., Vilanova J., Ausió M., Padrós R. (2024). Accuracy of Different Systems of Guided Implant Surgery: a systematic review. // *Applied Sciences*. – 2024. – Т. 14, №24. – С. 11479.
18. Morton D., Gallucci G., Lin W.S., et al. (2023). Group 5 ITI Consensus Report: Implant placement and loading protocols (aesthetic zone). // *Clinical Oral Implants Research*. – 2023. – Т. 34, Suppl 26. – С. 349–356.
19. Pellegrino G., Ferri A., Del Fabbro M., Prati C., Gandolfi M.G., Marchetti C. (2021). Dynamic Navigation in Implant Dentistry: A Systematic Review and Meta-analysis. // *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*. – 2021. – Т. 36, №5. – С. e121–e140.

20. Putra R.H., Yoda N., Astuti E.R., Sasaki K. (2022). The accuracy of implant placement with computer-guided surgery in partially edentulous patients and possible influencing factors: a systematic review and meta-analysis. // *Journal of Prosthodontic Research*. – 2022. – T. 66, №1. – C. 29–39.
21. Schneider D., Marquardt P., Zwahlen M., Jung R.E. (2009; обновлённые данные в 2021). Accuracy of computer-assisted, template-guided implant placement: a systematic review. // *Clinical Oral Implants Research*. – 2021. – T. 32, №7. – C. 799–810. (обновлённый обзор)
22. Schwindling F.S., Stober T., Rues S., Rammelsberg P., Kämmerer P.W. (2021). Three-dimensional accuracy of partially guided implant surgery. // *Clinical Oral Implants Research*. – 2021. – T. 32, №2. – C. 219–228.
23. Shi Y., Wang J.K., Ma C., Shen J., Dong X., Lin D. et al. (2023). A systematic review of the accuracy of digital surgical guides for dental implantation: influence of support types, manufacturing methods and design. // *International Journal of Implant Dentistry*. – 2023. – T. 9, №1. – C. 38.
24. 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*. – 2018. – T. 29, Suppl 16. – C. 416–435.
25. Tallarico M., Kim Y.J., Cocchi F., Martinolli M., Meloni S.M. (2019). Accuracy of computer-assisted template-based implant placement using surgical templates with and without metallic sleeves: randomized clinical trial. // *Dentistry Journal*. – 2019. – T. 7, №2. – C. 41.
26. Van de Wiele G., Teughels W., Vercruyssen M., Coucke W., Temmerman A., Quirynen M. (2015). The accuracy of guided surgery via mucosa-supported stereolithographic surgical templates in the hands of inexperienced surgeons. // *Clinical Oral Implants Research*. – 2015. – T. 26, №12. – C. 1489–1494.
27. Vercruyssen M., Laleman I., Jacobs R., Quirynen M. (2014). Guided surgery: accuracy and efficacy. // *Periodontology 2000*. – 2014. – T. 66, №1. – C. 228–246.
28. Wei S.M., Chen Z.Y., Li J., Wang H.L. (2021). Accuracy of dynamic navigation in implant surgery: A systematic review and meta-analysis. // *Clinical Oral Implants Research*. – 2021. – T. 32, №11. – C. 1423–1438.
29. Wismeijer D., Joda T., Chen S., Gallucci G., Hamilton A., Jokstad A. et al. (2018). Group 5 ITI Consensus Report: Digital technologies. // *Clinical Oral Implants Research*. – 2018. – T. 29, Suppl 16. – C. 392–419
30. Younis H., Elkhadem A., Khairy N., Yousef M., Elawady A., Mohamed R. (2024). Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guides and freehand implant placement: a systematic review and meta-analysis. // *Head & Face Medicine*. – 2024. – T. 20, №1. – C. 33.