

РОБОТИЗИРОВАННАЯ ИМПЛАНТАЦИОННАЯ ПРАКТИКА В СОВРЕМЕННОЙ СТОМАТОЛОГИИ. ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕГРАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА С РОБОТАМИ ИМПЛАНТОЛОГАМИ

Филатов Сергей Николаевич

Московский государственный
медико-стоматологический университет;
Чжункэ ягу (подрайон Гуанвэнь, район Куйвэнь,
город Вэйфан, провинция Шаньдун, Китай)
dentist_filatov@inbox.eu

ROBOTIZED IMPLANTATION PRACTICE IN MODERN DENTISTRY. PROSPECTS FOR THE INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE WITH IMPLANTOLOGY ROBOTS

S. Filatov

Summary. The article is devoted to the urgent problem of improving the accuracy and safety of dental implantation, one of the leading methods of restoring lost teeth. It is emphasized that the accuracy of implant positioning is a key factor in the long-term success of treatment, and existing manual and navigation techniques are influenced by the human factor. Various types of robotic systems (active, passive, semi-active) and specific models presented in the scientific literature (YakeBot, r-CAIS, Yomi, DentRobot, Remebot, Theta, HRCDIS, Langyue, HRS-DIS) are described. A comparative analysis of the accuracy of robotic implantation with traditional manual and computer navigation methods based on published research data has been carried out. The prospects of integrating artificial intelligence for further improvement of implantological procedures are noted.

Keywords: dental implants, robotic implantation, positioning accuracy, surgical robots, computer implantation surgery, artificial intelligence in dentistry.

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме повышения точности и безопасности дентальной имплантации — одного из ведущих методов восстановления утраченных зубов. Подчеркивается, что точность позиционирования имплантата является ключевым фактором долгосрочного успеха лечения, а существующие мануальные и навигационные методики подвержены влиянию человеческого фактора. Описываются различные типы роботизированных систем (активные, пассивные, полупассивные) и конкретные модели, представленные в научной литературе (YakeBot, r-CAIS, Yomi, DentRobot, Remebot, Theta, HRCDIS, Langyue, HRS-DIS). Проведен сравнительный анализ точности роботизированной имплантации с традиционными мануальными и компьютерными навигационными методами на основе данных опубликованных исследований. Отмечается перспективность интеграции искусственного интеллекта для дальнейшего совершенствования имплантологических процедур.

Ключевые слова: дентальные имплантаты, роботизированная имплантация, точность позиционирования, хирургические роботы, компьютерная имплантационная хирургия, искусственный интеллект в стоматологии.

Введение и актуальность исследования

Современная стоматология достигла значительных успехов, и дентальная имплантация стала неотъемлемой ее частью, являясь предпочтительным методом восстановления зубов, утраченных по различным причинам, таким как заболевания пародонта, воспалительные процессы или травмы. Этот метод позволяет эффективно восстановить нормальную жевательную функцию, речь, здоровье полости рта и эстетику улыбки пациента.

Ключевым фактором, определяющим долгосрочный успех имплантации, является точность позиционирования имплантата во время хирургического вмешательства, что обеспечивает стабильность и его выживаемость под нагрузкой. Даже незначительные отклонения от запланированного положения могут негативно ска-

заться на долгосрочной эффективности лечения и привести к серьезным осложнениям, как во время операции (например, кровотечение, повреждение нервов), так и в последующем периоде, вплоть до потери имплантата. Существующие методики, включая компьютерную хирургию с использованием шаблонов или динамической навигации, хотя и повышают точность по сравнению с мануальной установкой, однако не исключают влияние человеческого фактора, как например уровень квалификации хирурга при выполнении манипуляций.

В этом контексте актуальность исследования роботизированных систем в дентальной имплантации неуклонно возрастает. Хирургические роботы представляют собой передовую технологию, способную обеспечить более высокую точность позиционирования имплантата и меньшую инвазивность процедуры. Роботизированные системы, оснащенные визуальными и навигацион-

ными компонентами, способны выполнять подготовку ложа и установку имплантата строго по предоперационному плану, минимизируя риски, связанные с человеческим фактором, такими как тремор рук, усталость хирурга и его квалификация.

Разработаны различные типы роботов, в разной степени взаимодействующие с хирургом: активные, пассивные, полуактивные. Исследование их эффективности, точности и безопасности подтверждают значимость развития этого направления. Одной из задач современной имплантологии является сравнение точности роботизированной имплантации с традиционными мануальными и навигационными методами, оценки работы различных типов роботов на результаты лечения и изучение потенциала интеграции искусственного интеллекта для дальнейшего совершенствования имплантологических процедур. Таким образом, изучение возможностей и ограничений роботизированной хирургии имеет высокую научную и практическую значимость и направлено на повышение качества, предсказуемости, безопасности дентальной имплантации и улучшение результатов лечения пациентов.

Материал и методы

Настоящий анализ основан на обзоре и синтезе данных из опубликованных исследований, посвященных применению роботизированных систем в дентальной имплантации. Рассматриваемые технологии включают различные типы роботов, классифицируемые по уровню взаимодействия хирурга с системой: на активные, полуактивные и пассивные системы [3, 6].

В анализ включены данные по следующим конкретным роботизированным системам, описанным в литературе: YakeBot (активный робот, выполняющий автономное сверление и установку имплантата) [6, 12], r-CAIS (активный робот, модификация Remebot, с возможностью автономного выполнения задач под наблюдением хирурга) [1, 10], Yomi (пассивный робот с координатно-измерительной машиной для позиционирования импланта и рабочей руки, которой вручную управляет хирург) [5], DentRobot (пассивный робот с оптическим отслеживанием и ручным управлением) [3], Remebot (полуактивный робот с автоматической корректировкой положения и сверлением под ручным контролем) [6, 10, 14], Theta (полуактивный робот с оптической навигацией, датчиками силы и манипулятором UR-3e с вращающимися запястными суставами) [3, 8, 11], HRCDis (полупассивный робот для совместной работы человека и машины с визуальным отслеживанием положения с оптической камерой и маркерами позиционирования) [7], Langue (полуактивный коллаборативный робот с автономным позиционированием и пассивным запуском сверления с участием хирурга) [9], и HRS-DIS (полуактивный робот

с гибридной кинематикой манипуляторов и навигационной системой) [4].

Эффективность роботизированных систем оценивалась путем сравнения их показателей с показателями традиционной хирургии свободной руки и компьютерной имплантационной хирургии с использованием статических шаблонов или динамических навигационных систем (таких как Yizhimei [8] и Beidou-SNS [4]).

Основным методом оценки точности установки имплантатов во всех цитируемых исследованиях служил анализ послеоперационных конусно-лучевых компьютерных томограмм (КЛКТ). Степень отклонения фактического положения имплантата от запланированного измерялась по трем параметрам: коронарное отклонение (линейное смещение на уровне шейки имплантата), апикальное отклонение (линейное смещение на уровне верхушки имплантата) и угловое отклонение (разница в градусах между осями запланированного и установленного имплантата), согласно методологии, описанной Талмазовым и соавторами [11, 17].

Дополнительно оценивались временные параметры операции: время необходимое для предоперационной подготовки робота (калибровка, регистрация, планирование траектории движения) и продолжительность хирургического вмешательства (от подготовки ложа до установки имплантата) [6, 9, 12, 20]. Также учитывались данные о безопасности процедур, в частности, наличие или отсутствие интраоперационных осложнений, таких как кровотечение или повреждение нервных структур [1, 9, 10, 11].

Следует отметить, что большинство рассмотренных исследований фокусировались на этапах остеотомии и установки имплантата, преимущественно с использованием безлоскутного хирургического доступа [23,24]. Исследования часто проводились на фантомных моделях, хотя имеются и клинические случаи. Сложные клинические ситуации, требующие вспомогательных костнопластических процедур (например, направленной костной регенерации (GBR), синус-лифтинга) или связанные с анатомическими ограничениями (например, ограниченное открывание рта, установка имплантатов в области вторых моляров), как правило, не входили в область применения описанных роботизированных систем [23, 24].

Результаты

Анализ представленных исследований показывает, что внедрение роботизированных систем в дентальную имплантологию демонстрирует значительный потенциал для повышения точности хирургических вмешательств. Основным результатом, последовательно от-

мечаемым в различных работах, является существенное превосходство роботов над традиционными мануальными методиками в точности позиционирования имплантатов. Это подтверждается измерениями отклонений по коронарным, апикальным и угловым параметрам после операции с использованием конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) [11].

Сравнительные исследования роботизированных систем с методами компьютерной динамической навигации также указывают на преимущества роботов. В частности, системы — полуактивный робот Theta [8] и полупассивный робот HRS-DIS [4] продемонстрировали меньшие угловые отклонения по сравнению с динамическими навигационными системами Yizhimei и Beidou-SNS соответственно. Среднее угловое отклонение для робота HRS-DIS составило $1 \pm 0.48^\circ$, в то время как для системы Beidou-SNS оно было $2.41 \pm 1.42^\circ$ [4], а для Theta-Yizhimei составило $1.08 \pm 0.66^\circ$ и $2.32 \pm 0.71^\circ$ соответственно. Повышенная точность роботизированных систем объясняется их способностью стабилизировать положение и ось сверла, исключая влияния нестабильности руки хирурга и его опыта, факторов, которые могут снижать точность при использовании динамической навигации [3, 4, 8, 18].

Точность также варьируется в зависимости от типа робота. Активные (например, Yakebot) и полуактивные (например, Remebot) роботы показали схожие, высокие уровни точности. Пассивные роботы (например, DentRobot), где хирург вручную направляет роботизированную руку, продемонстрировали большие отклонения [6]. Это объясняется тем, что активные и полуактивные системы обеспечивают более стабильный захват наконечника по сравнению с выполнением процедур вручную [4]. Кроме того, автоматическая калибровка и регистрация в навигационных системах роботов снижают влияние человеческого фактора по сравнению с визуальной калибровкой [19].

Что касается времени операции, исследования показывают, что общая продолжительность процедур с использованием роботов сопоставима с операциями, выполняемыми вручную [6, 9]. Однако время может варьироваться. Например, установка одного имплантата с помощью полуактивного робота Langue занимала 20–25 минут, а операции на двух беззубых челюстях — 47 и 70 минут, причем автоматическая регистрация делала этот тип робота эффективным для полной адентии [9]. Пассивные роботы могут обеспечивать самое короткое время самой операции, так как хирург напрямую направляет руку робота во время операции [1, 6]. Однако время предоперационной подготовки может быть дольше для активных роботов из-за необходимости сложной калибровки и планирования траектории движения [6, 12], в то время как у полуактивных роботов с автоматической регистрацией оно минимально [20].

С точки зрения безопасности, в рассмотренных клинических исследованиях не было зарегистрировано серьезных осложнений, таких как кровотечения или повреждения нервов [10, 11, 18].

Главным преимуществом роботизированных систем является их стабильная точность, не подверженная влиянию усталости, стресса или тремора рук хирурга. Тем не менее, большинство систем требуют контроля или взаимодействия со стороны человека, чаще всего реализуя «полуактивный» подход, где робот выполняет сверление, а хирург наблюдает и может вмешаться [4–6, 9].

Несмотря на многообещающие результаты по точности, роботизированные системы имеют ограничения. Отмечается нехватка крупных, высококачественных клинических исследований для подтверждения долгосрочной выживаемости и эффективности, так как многие данные получены на фантомных моделях. Существенными барьерами являются высокая стоимость систем, трудности при работе в ограниченном пространстве (ограниченное открывание рта, область вторых моляров) и неспособность выполнять сложные вспомогательные процедуры, такие как направленная костная регенерация (GBR), синус-лифтинг или использование трансплантатов, часто необходимые перед имплантацией [23, 24]. Современные роботы также не предназначены для сложных клинических случаев (например, при близости к нервам или гайморовым пазухам, в эстетически значимой зоне, при недостаточном объеме или качестве кости). Эти задачи по-прежнему требуют опыта и навыков хирурга-стоматолога.

Интеграция искусственного интеллекта (ИИ) рассматривается как перспективное направление развития [2]. Алгоритмы ИИ могли бы анализировать КТ-данные, оптимизировать планы лечения, управлять движениями робота и даже адаптироваться к непредвиденным ситуациям во время операции на основе данных в реальном времени (плотность кости, близость анатомических структур), повышая безопасность и автономность систем [21, 22].

Обсуждение

Современная стоматология сегодня немыслима без имплантации. Благодаря достижениям в технологии имплантации, дентальные имплантаты стали предпочтительным выбором для восстановления нормальной жевательной функции, речи, здоровья и эстетики пациентов, стали идеальным решением для пациентов, которые потеряли зубы из-за различных причин, таких, например, как заболевания пародонта, воспалительные процессы в зубах, травмы. Планируемое положение имплантата имеет решающее значение для достижения успешных результатов: долгосрочную стабильность под

нагрузкой и выживаемость. Незначительное отклонение положения имплантата может повлиять на долгосрочную эффективность и потенциально привести к различным осложнениям в процессе операции (кровотечение, повреждение нервов) и потери имплантата под нагрузкой ортопедическими конструкциями [1].

Хирургические роботы предлагают более высокую точность и меньшую инвазивность, что дает лучший результат и снижает риск осложнений [2]. Роботы для имплантации состоят из трех основных частей: роботизированной операционной структуры, визуальной системы и центральной системы управления. Эти элементы выполняют функции, аналогичные функциям рук, глаз и мозга стоматолога соответственно [3]. При выполнении операции центральная система управления использует визуальную систему для определения текущего положения области имплантации.

Затем она направляет роботизированную руку для подготовки места имплантации и установки имплантата на основе предоперационного плана [4]. При помощи навигационной системы, повышается точность в позиционировании имплантата и снижению рисков во время операции [2, 3].

В современных роботах роботизированная рука обеспечивает физическое руководство с помощью тактильной обратной связи при позиционировании имплантата, а также в систему интегрирован трекер пациента для отслеживания движений пациента и предоставления обратной связи в реальном времени на экране монитора. Наконец, роботизированная система контролируется и управляется человеком-оператором, что позволяет гибко вносить изменения в план лечения и останавливать процедуру сверления при необходимости [4]. В настоящее время разработаны следующие типы роботов для дентальной имплантации: активные, пассивные и полуактивные системы, в зависимости от уровня взаимодействия между стоматологом и роботом [3, 6].

В последнее время, предоставлен ряд исследований по оценке точности установки имплантатов и комфорта пациента с помощью робота, и сравнительная оценка работы робота и динамической навигационной системы [1–11].

Робот YakeBot разработанный YakeBot Technology Co., Ltd (Пекин, Китай), представляет собой передовую роботизированную имплантационную систему. Этот робот оснащен роботизированной рукой, которая способна автономно входить и выходить из рта пациента, а также выполнять задачи по сверлению и установке имплантатов [6,12]. Во время процедуры стоматолог-хирург активирует робота с помощью педали контроллера. Затем роботизированная рука перемещается в указанную об-

ласть и автоматически регулирует положение наконечника на основе предоперационного плана. Робот приступает к подготовке ложа имплантата путем сверления с заданной скоростью. После окончания сверления роботизированная рука возвращает наконечник в исходное положение. Затем хирург заменяет сверло, и робот повторяет процесс согласно протоколу сверления, в завершении которого устанавливается имплантат. На протяжении всей операции YakeBot управляет движением роботизированной руки, подготовкой ложа имплантата и установкой имплантата, в то время как хирург наблюдает за операцией и дает инструкции.

Этот совместный подход позволяет повысить точность и эффективность процедур имплантации зубов, потенциально снижая риск человеческой ошибки и улучшая результаты для пациентов [6,13].

Автономная роботизированная компьютерная имплантационная хирургия (r-CAIS): r-CAIS — это усовершенствованный робот для стоматологической хирургии, созданный на основе робота Remebot, но с модификациями, делающими его активным роботом [10]. Он предназначен для выполнения остеотомии и установки имплантата под наблюдением хирурга.

Технологию, лежащую в основе r-CAIS, можно разделить на две системы: помощь робота и автономное выполнение задач [1]. В системе помощи робота r-CAIS использует полуактивного робота Remebot, который состоит из рабочей руки и руки машины для измерения координат. Эта система обеспечивает визуальное руководство и физическую обратную связь (тактильную обратную связь) с хирургом во время процесса остеотомии и установки имплантата [1]. Однако хирург по-прежнему сохраняет непрерывный контроль над рабочей рукой, что может приводить к ошибкам и быть сложным в управлении. С другой стороны, роботизированная система с автономной задачей дает хирургу дискретный контроль над системой r-CAIS. В этой системе хирург указывает место для установки имплантата, а роботизированная система автономно выполняет задачу подготовки ложа имплантата. Роль хирурга заключается в наблюдении за процедурой и вмешательстве при необходимости. В целом, r-CAIS — это активный стоматологический хирургический робот, который сочетает в себе роботизированную помощь и автономию задач для повышения точности и эффективности остеотомии и процедур установки имплантатов [10].

Робот для стоматологической хирургии Yomi — это пассивный робот-имплантолог, разработанный компанией Neocis в США, использующий руку координатно-измерительной машины (КИМ) для точного позиционирования имплантата.

Система Yomi состоит из рабочей руки, которой вручную управляют хирурги, и руки КИМ, которая автоматически позиционирует имплантат [5]. Во время процедур сверления и установки имплантата, хирурги используют рабочую руку робота, в то время как рука КИМ обеспечивает точное позиционирование зубного имплантата. Стоит отметить, что рука КИМ стоит дороже и занимает много пространства в полости рта пациента [6]. Yomi получил одобрение Управления по контролю за продуктами и лекарствами США (FDA) в 2017 году [3]. Робот для стоматологической хирургии DentRobot: DentRobot, представленный компанией Dcarer Medical Technology Co., Ltd. в 2022 году, представляет собой пассивного робота-имплантолога [3], использует технологию оптического отслеживания и управляется хирургом с помощью педали контроллера. Хирург вручную направляет роботизированную руку в рот пациента, чтобы подготовить место имплантации и установить имплантат.

Во время процесса сверления роботизированная рука обеспечивает трехмерное физическое руководство для хирурга. Если положение наконечника не является оптимальным, робот автоматически настраивает и перемещает его в идеальное положение. После достижения заданной глубины хирург извлекает роботизированную руку изо рта и заменяет сверло и повторяет процесс до тех пор, пока имплантат не будет установлен. В обязанности хирурга входит маневрирование роботизированной рукой во рту, подготовка места имплантации, замена сверла и установка имплантата. Кроме того, хирург контролирует работу робота и дает необходимые инструкции [6].

Робот для стоматологической хирургии Remebot разработан в 2023 году компанией Baihui Weikang Technology Co., Ltd (Пекин, Китай) и является полупассивным роботом-имплантологом [10]. Хотя он может самостоятельно выполнять определенные задачи, ему все равно требуется ручная помощь оператора на определенных этапах процедуры. Чтобы управлять Remebot, хирург использует педаль контроллер, чтобы направлять и устанавливать роботизированную руку в рот пациента. Оказавшись внутри, роботизированная рука берет на себя управление и автоматически регулирует положение наконечника, а также сверление с заданной скоростью на основе предоперационного плана. Центральная система управления обеспечивает точное позиционирование сверла. После подготовки ложа имплантата роботизированная рука возвращает наконечник в исходное положение. Процесс продолжается заменой сверла хирургом, и этот цикл повторяется до тех пор, пока имплантат не будет успешно установлен. На протяжении всей процедуры основные обязанности хирурга включают в себя управление роботизированной рукой, замену сверла, установку имплантовода и имплантата, предоставление инструкций и контроль общей работы робота.

Стоит отметить, что Remebot представляет собой прогресс в технологии дентальной имплантации, автоматизируя определенные аспекты процедуры. Однако он по-прежнему зависит от опыта и контроля обученного хирурга для обеспечения оптимальных результатов и безопасности пациента [6,14].

Робот для стоматологической хирургии Theta, разработанный компанией Hangzhou Jianjia Robot Co. LTD в 2023 году — это полупассивный робот для дентальной имплантации [3,8]. Он сочетает в себе блоки управления и оптическую навигационную систему для обеспечения точного позиционирования, сверления и установки дентальных имплантатов. Система включает в себя манипулятор UR-3e с полностью вращающимися запястными суставами и концевыми суставами, способными к бесконечному вращению [8,11]. Используя датчики силы, манипулятор может эффективно взаимодействовать с пользователями для точного позиционирования. Theta — это комплексная система, которая включает в себя механическую руку, бинокулярную камеру, управляющий компьютер и интегрирующую платформу. Манипулятор оснащен наконечником для выполнения дентальной имплантационной операции. Эта система предлагает расширенные возможности для повышения точности и эффективности процедур дентальной имплантации, в конечном итоге принося пользу как стоматологам, так и пациентам [8,11].

Система для совместной работы хирурга имплантолога и робота (HRCDIS): HRCDIS — это полупассивный робот. Он включает в себя схему ручного управления с нулевым усилием и систему управления оперативными задачами [7]. Робот использует визуальную систему отслеживания положения, включающую оптическую камеру и маркер позиционирования, а также модифицированный кобот UR5 от Universal Robots. С помощью этой установки HRCDIS точно определяет положение руки робота, идентифицирует точное место и направление сверления и выполняет автоматические операции сверления. Полупассивная природа робота позволяет ему работать в тандеме с хирургами — операторами, повышая производительность и эффективность в задачах, связанных со сверлением [7].

Робот для стоматологической хирургии Langyue, разработанный Shecheng Co. Ltd., это полупассивный коллаборативный робот. Он включает в себя как автономные, так и пассивные инициированные действия для оптимизации хирургического процесса [9]. Робот способен автономно выполнять такие задачи, как позиционирование инфракрасного следящего зонда и роботизированной руки, поддержание направления сверления и отслеживание движения пациента. Однако для фактической процедуры сверления требуется участие человека. Хирург инициирует процесс сверления, оказывая небольшое

давление на наконечник, и он полностью контролирует давление и скорость сверла с помощью тактильного контроллера [9]. Роботизированная система обеспечивает автоматический контроль угла, позволяя хирургу направлять сверло вперед или извлекать его. Как только сверло достигает нужной глубины, роботизированная система останавливает наконечник, чтобы предотвратить дальнейшее сверление. Робот для стоматологической хирургии *Language* состоит из нескольких компонентов, включая основную роботизированную руку, вспомогательную роботизированную руку, оснащенную камерой, систему сверления дентальных имплантатов и контроллер [3, 9].

Гибридная роботизированная система для дентальной имплантационной хирургии (HRS-DIS). HRS-DIS — это полуактивный робот, разработанный в Шанхае, Китай. Он состоит из серийного манипулятора с 5 степенями свободы (DOF) и манипулятора Стюарта с 6 степенями свободы [4]. Серийный манипулятор расширяет рабочее пространство робота, в то время как манипулятор Стюарта обеспечивает точное позиционирование и жесткость. Робот использует наконечник, прикрепленный к манипулятору Стюарта, что позволяет хирургу вручную управлять его движениями с помощью датчика силы.

Такой подход предотвращает любой потенциальный вред пациенту во время процедуры. Робот оснащен навигационной системой, которая отслеживает текущее положение и обменивается данными с роботом. Сначала хирург настраивает выравнивание сверла параллельно целевой траектории с помощью манипулятора. Затем он вручную позиционирует наконечник близко к точке входа траектории сверления ложа имплантата. Вторая тонкая настройка выполняется с помощью манипулятора, и сверло поднимается на 2 мм выше точки входа. Робот автоматически выполняет остеотомию и возвращается в исходную точку после завершения сверления. Затем наконечник вынимается изо рта, и вручную заменяется следующее сверло. Наконец, робот устанавливает дентальные имплантаты [4].

Различные технологии были внедрены для улучшения процесса установки имплантатов, включая компьютерную имплантационную хирургию [15]. Целью компьютерной имплантационной хирургии является достижение лучших клинических результатов за счет снижения неудач, осложнений и побочных эффектов [3, 15]. Компьютерная имплантационная хирургия включает два основных технологических подхода: статическую и динамическую компьютерную имплантационную хирургию. В статической хирургии используется хирургический шаблон для направления остеотомии и установки имплантата. Компьютерная система, известная как навигация в реальном времени, помогает хирургам, используя оптические устройства слежения для обеспе-

чения прямой визуализации во время процедуры. Обе системы широко используются и тщательно изучаются, показывая свою способность помогать хирургам достигать более высокой точности установки имплантатов по сравнению с хирургией свободной руки [3, 15].

Без сомнения, компьютерные технологии улучшили предоперационное планирование, а хирургические шаблоны и видеонавигация обеспечивают более высокую эффективность имплантации, они все еще имеют некоторые ограничения [15, 16]: точность и стабильность во время сверления, а также на установку имплантатов вручную может влиять человеческий фактор.

Внедрение роботизированных систем в дентальной имплантационной хирургии предлагает очевидные улучшения точности и безопасности, и недавние исследования показали многообещающие результаты в этом направлении [3,4].

Во всех исследованиях точность позиционирования имплантата оценивалась с использованием методологии, описанной Талмазовым и соавторами. [17] Послеоперационная конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ) использовалась для измерения степени отклонения в трех аспектах фактического размещения имплантата: коронарное, верхушечное и угловое.

Осевое отклонение представляет собой угол в градусах между гипотетической центральной осью размещенного имплантата и планируемым имплантатом. По сравнению с размещением вручную, размещение имплантата с помощью робота показало значительно большую позиционную точность [11].

Тао и др. [4] и Чен и др. [8] провели исследования, сравнивающие точность роботизированной установки и компьютерных методов динамической навигации. Чен и др. [8] обнаружили, что роботизированная система установки (Theta) имела меньшие угловые отклонения по сравнению с компьютерной системой динамической навигации (Yizhimei). Значения линейного отклонения в области шейки имплантата составили 0.58 ± 0.31 мм, 0.69 ± 0.28 мм в области апекса, и угловое отклонение $1.08 \pm 0.66^\circ$, в то время как для динамической системы Yizhimei эти значения: 0.73 ± 0.2 мм, 0.86 ± 0.33 мм и 2.32 ± 0.71 соответственно [8]. В другом исследовании Тао полупассивная роботизированная система HRS-DIS сравнивалась с динамической навигационной системой *Beidou-Surgical navigation system (SNS)*. Результаты показали, что роботизированная система имела более высокую точность позиционирования имплантата по сравнению с динамической навигационной системой. Среднее отклонение угла составило $2.41 \pm 1.42^\circ$ для *Beidou-SNS* и $1 \pm 0.48^\circ$ для HRS-DIS, и незначительной разницей в линейном отклонении шейки и апекса имплан-

тата [4]. Результаты показывают, что роботизированная система обеспечивает большую точность позиционирования имплантата по сравнению с динамической навигационной системой, что показывает ее высокий потенциал как ценного инструмента для дентальной имплантационной хирургии. Повышенная точность роботизированной системы связана с ее способностью стабилизировать местоположение и ось сверления устраняя человеческий тремор рук. С другой стороны, компьютерная динамическая навигация в значительной степени зависит от навыков и опыта хирурга, что может вносить изменчивость в точность размещения имплантата [3, 4, 8, 18].

В исследовании, проведенном Сюй и соавторами [6], сравнили различные типы роботов для дентальной имплантации, включая активного робота (Yakebot), полуактивного робота (Remebot) и пассивного робота (DentRobot). Исследователи обнаружили, что точность установки имплантата повышалась при использовании роботов, которые в разной степени взаимодействовали с хирургом во время процедуры. Активные и полуактивные роботы продемонстрировали схожие уровни точности установки имплантата. Напротив, пассивный робот показал большие отклонения в установке имплантата. Это несоответствие можно объяснить тем фактом, что роботизированные руки обеспечивают более стабильный и точный захват наконечника во время операции, эффективно минимизируя потенциальный тремор руки, который может присутствовать, когда стоматолог выполняет процедуру вручную [10]. Кроме того, навигационная система для дентальной имплантационной хирургии автоматически калибрует и регистрирует роботизированную руку, положение пациента и оптический трекер. Это устраняет необходимость ручной калибровки и снижает влияние человеческого фактора по сравнению с калибровкой и регистрацией, выполняемыми исключительно путем визуального наблюдения [19].

Исследования показали, что продолжительность операции с использованием роботов сопоставима с операциями, выполняемыми вручную [6,9]. Однако исследование, проведенное Цяо и др. [9], дало некоторое представление о влиянии роботов на время операции. Они обнаружили, что при установке имплантата одного зуба хирургические процедуры занимали около 20–25 минут, в то время как для двух беззубых челюстей процедуры занимали 47 и 70 минут. Они использовали полуактивного робота Languye, что исключало необходимость ручной регистрации и калибровки, что делало его более эффективным вариантом для случаев полной адентии [9]. Кроме того, время операции варьировалось в зависимости от типа используемого робота.

Активный робот имел самое длительное время операции, в то время как пассивный робот имел самое ко-

роткое время операции. Это было связано с тем, что стоматолог напрямую направлял роботизированную руку во время подготовки ложа имплантата в случае пассивного робота, что приводило к более быстрой процедуре [1,6]. Также важно отметить, что использование роботов для имплантации может увеличить время предоперационной подготовки. Сюй и др. [6,12] продемонстрировали, что у активного робота было самое длительное время подготовки из-за необходимости переноса пространственного положения сверла, проведения калибровки и регистрации, а также планирования движения роботизированной руки во рту и вне его. Пассивный робот требовал ручных манипуляций для калибровки и регистрации, в то время как центральная система управления полуактивного робота автоматически распознавала регистрацию. Таким образом, у полуактивного робота было самое короткое время предоперационной подготовки. [20].

Проблемы безопасности во время операции имплантации включают в себя потенциальные осложнения, связанные с кровотечением, повреждением нервов и риском аспирации инородных тел. В ходе клинических исследований не было зарегистрировано никаких осложнений [1, 9–11]. Важным фактом, во всех случаях было то, что роботизированные системы, независимо от типа, продемонстрировали более высокую точность и правильность позиционирования имплантата по сравнению с хирургами-практиками и динамическими навигационными системами. Это означает, что роботизированные системы превосходят точность, достигнутую даже опытными врачами-клиницистами [1–11]. Главным преимуществом роботизированных систем является отсутствие усталости или изменчивости, свойственных хирургам-операторам. Такие факторы, как истощение, стресс или отвлечения, не влияют на точность роботов, в отличие от человека-хирурга. Роботизированная рука также может избегать естественного тремора рук, которое может привести к непреднамеренным отклонениям. Однако все роботизированные системы по-прежнему требуют определенного уровня человеческого контроля или сотрудничества. Большинство исследователей использовали «полуактивный» подход, когда робот выполняет сверление и установку имплантата, но хирург следит за ходом операции и может вмешаться при необходимости. [4–9] Роботизированные системы имеют достаточно быстрое время подготовки. Длительность операции была сопоставима с операциями, выполняемыми человеком [6, 9].

Внедрение искусственного интеллекта (ИИ) в эти системы может подтолкнуть их к совершенно новой парадигме [2]. Алгоритмы ИИ могут анализировать анатомические КТ-сканы, разрабатывать оптимальные планы лечения имплантации, сравнивать пред- и послеоперационные сканы и даже более разумно управлять движе-

ниями робота [21]. В процессе операции, ИИ проводит оценку плотности костной ткани в реальном времени, близости к жизненно важным структурам и может обеспечить более безопасное и динамичное хирургическое руководство [22]. Вместо того, чтобы просто следовать заранее определенному плану, роботы с искусственным интеллектом могут реагировать на неожиданные ситуации и совершенствовать процесс принятия решений. Они также могут накапливать хирургический опыт и данные по всем операциям, используя комплекс этих знаний для совершенствования методов лечения. По мере развития вычислительной техники и возможностей ИИ, внедрение интеллектуальных обучающих систем в стоматологических роботов может сделать их автономными хирургами, выполняющими процедуры с гораздо большей точностью.

Многообещающие результаты точности современных роботов, вероятно, представляют собой только начало для ИИ преобразующего робототехнику дентальной имплантации [39]. Хотя роботизированные системы демонстрируют явные преимущества при установке имплантатов, важно отметить их ограничения при выполнении сложных реконструктивных процедур. Основным ограничением, отмеченным в рассмотренных исследованиях, было отсутствие высококачественных клинических исследований. Многие результаты были получены с помощью фантомных моделей.

Более обширные клинические исследования по установке имплантатов с помощью робота будут иметь решающее значение для демонстрации долгосрочной безопасности и эффективности, прежде чем эти системы получат более широкое распространение. Тем не менее, первоначальные результаты демонстрируют значительное улучшение точности и правильности позиционирования имплантатов, что является весомым аргументом в пользу роботизированной стоматологической хирургии, несмотря на высокую стоимость в настоящее время, и роботизированные руки имеют ограничения для случаев с ограниченным открыванием рта и в труднодоступных областях вторых моляров.

Рассмотренные исследования были сосредоточены в основном на остеотомии и установке имплантата, но перед имплантацией часто требуются ряд вспомогательных операций, таких как направленная костная регенерация (GBR), синус лифтинг, или использование трансплантационных материалов для обеспечения достаточного объема костной ткани [23,24]. Эти манипуляции недоступны современным роботам. Во всех исследованиях использовался безлоскутный подход, избегая необходимости подъема мягких тканей или имплантация в лунку удаленного зуба хирургом непосредственно перед имплантацией.

Заключение

В заключение следует отметить, что у роботов для имплантации зубов есть ограничения, в том числе стоимость, сложность доступа к труднодоступным областям (например, вторым молярам) и невозможность справляться со сложными случаями (например, недостаточным качеством и количеством кости) и выполнять реконструктивные процедуры и синус-лифтинг. Эти задачи по-прежнему требуют квалифицированного хирурга. Однако роботы для имплантации продемонстрировали хорошую точность позиционирования имплантатов. Для обеспечения долгосрочной безопасности и эффективности необходимы дальнейшие высококачественные клинические исследования.

Было бы полезно провести больше исследований и изучить различные случаи. Кроме того, необходимы новые роботы с большим количеством опций и функциональностью по сравнению с существующими роботами для имплантации зубов. Эти новые роботы должны управляться ИИ, иметь меньший размер и возможность помогать стоматологам во время вспомогательных операций, таких как процедуры GBR и синус-лифтинга. Интеграция искусственного интеллекта в роботов-имплантологов может произвести революцию в этой области, обеспечивая руководство в режиме реального времени, динамическое принятие решений и автономные хирургические возможности.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Greenstein, J. Cavallaro, G. Romanos, D. Tarnow Clinical recommendations for avoiding and managing surgical complications associated with implant dentistry: a review J Periodontol, 79 (2008), pp. 1317–1329
2. M. Natarajan A review of robotics in dental implantology J Indian Dent Assoc, 5 (2018), pp. 14–17
3. B. Tao, Y. Feng, X. Fan, et al. Accuracy of dental implant surgery using dynamic navigation and robotic systems: an in vitro study J Dent, 123 (2022)
4. K. jie Cheng, T. shu Kan, Y. feng Liu, et al. Accuracy of dental implant surgery with robotic position feedback and registration algorithm: an in-vitro study Comput Biol Med, 129 (2021)
5. Y. Yan, Y. Jia A review on human comfort factors, measurements, and improvements in human–robot collaboration Sensors, 22 (2022), p. 7431
6. T. shu Kan, K. jie Cheng, Y. feng Liu, et al. Evaluation of a custom-designed human—robot collaboration control system for dental implant robot Int J Med Robot Comput Assist Surg, 18(2022), p. e2346
7. J. Chen, X. Bai, Y. Ding, et al. Comparison the accuracy of a novel implant robot surgery and dynamic navigation system in dental implant surgery: an in vitro pilot study BMC Oral Health, 23 (2023), pp. 1–9

8. S.C. Qiao, X.Y. Wu, J.Y. Shi, M.S. Tonetti, H.C. Lai Accuracy and safety of a haptic operated and machine vision controlled collaborative robot for dental implant placement: a translational study *Clin Oral Implants Res*, 34 (2023), pp. 839–849
9. S. Yang, J. Chen, A. Li, K. Deng, P. Li, S. Xu Accuracy of autonomous robotic surgery for single-tooth implant placement: a case series *J Dent*, 132 (2023)
10. J.Y. Shi, B.L. Liu, X.Y. Wu, et al. Improved positional accuracy of dental implant placement using a haptic and machine-vision-controlled collaborative surgery robot: a pilot randomized controlled trial *J Clin Periodontol*, 5 (2024), pp. 24–32
11. S. Bai, N. Ren, Z. Feng, et al. Animal experiment on the accuracy of the autonomous dental implant robotic system *Chin J Stomatol*, 56 (2021), pp. 170–174
12. W. Wang, H. Xu, D. Mei, et al. Accuracy of the yakebot dental implant robotic system versus fully guided static computer-assisted implant surgery template in edentulous jaw implantation: a preliminary clinical study *Clin Implant Dent Relat Res* (2023) (in press)
13. T.C.T. van Riet, K.T.H. Chin Jen Sem, J.P.T.F. Ho, R. Spijker, J. Kober, J. de Lange Robot technology in dentistry, part two of a systematic review: an overview of initiatives *Dent Mater*, 37 (2021), pp. 1227–1236
14. J. Gargallo-Albiol, S. Barootchi, O. Salomy-Coll, H. Wang lay Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. a systematic review *Ann Anat*, 225 (2019), pp. 1–10
15. G. Talmazov, S. Bencharit, T.C. Waldrop, R. Ammoun Accuracy of implant placement position using nondental open-source software: an in vitro study *J Prosthodont*, 29 (2020), pp. 604–610
16. P. Dudek, T. Richardson, L. Bose, et al. Sensor-level computer vision with pixel processor arrays for agile robots *Sci Robot*, 7 (2022), Article eabl7755
17. J. Ruppini, A. Popovic, M. Strauss, E. Spruntrup, A. Steiner, C. Stoll Evaluation of the accuracy of three different computer-aided surgery systems in dental implantology: optical tracking vs. stereolithographic splint systems *Clin Oral Implants Res*, 19 (2008), pp. 709v716
18. X. Sun, F.D. McKenzie, S. Bawab, J. Li, Y. Yoon, J.K. Huang Automated dental implantation using image-guided robotics: registration results *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 6 (2011), pp. 627–634
19. S. Chen, Q. Ou, X. Lin, Y. Wang Comparison between a computer-aided surgical template and the free-hand method: a systematic review and meta-analysis *Implant Dent*, 28 (2019), pp. 578–589
20. M. Revilla-Leyn, M. Gimez-Polo, S. Vyas, et al. Artificial intelligence applications in implant dentistry: a systematic review *J Prosthet Dent*, 129 (2023), pp. 293–300
21. S.K. Bayrakdar, K. Orhan, I.S. Bayrakdar, et al. A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images *BMC Med Imag*, 21 (2021), p. 86
22. M. Chiapasco, P. Casentini, M. Zaniboni Bone augmentation procedures in implant dentistry *Int J Oral Maxillofac Implants*, 24 (2009), p. 237
23. M. Clementini, A. Morlupi, L. Canullo, C. Agrestini, A. Barlattani Success rate of dental implants inserted in horizontal and vertical guided bone regenerated areas: a systematic review *Int J Oral Maxillofac Surg*, 41 (2012), pp. 847–852
24. T.W. Oates, M. Robinson, J.C. Gunsolley Surgical therapies for the treatment of gingival recession. a systematic review *Ann Periodontol*, 8 (2003), pp. 303

© Филатов Сергей Николаевич (dentist_filatov@inbox.eu)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»