

## Робот-ассистированные и роботизированные системы, применяемые в стоматологии

### Аннотация

В представленном исследовании анализируется роль робот-ассистенции в стоматологии и основные пути ее дальнейшего развития. Были рассмотрены основные конструкции механотронных устройств и особенности их применения в стоматологии.

Проведен ретроперспективный анализ конструкций роботизированных и робот-ассистированных систем, применяемых в стоматологической практике.

Развитие робот-ассистированных и роботизированных систем должно включать в себя усовершенствование методов интраоперационной визуализации, средств диагностики, совершенствование хирургического инструментария, а также появление новых роботизированных разработок.

В данной статье анализируется роль робот-ассистенции в стоматологии и основные пути ее дальнейшего развития. Рассматриваются основные конструкции механотронных устройств и особенности их применения в стоматологии [1].

Роботизированная стоматология – это новое направление медицины, которое ориентировано на теоретическое обоснование, разработку и внедрение робот-ассистированных систем в качестве неотъемлемой части хирургических инструментов [2]. При использовании возможностей робота врач-стоматолог может дополнить свои навыки клинического мышления мануальной точностью робота [3].

Первое упоминание о применении робот-ассистированной системы «Рипа-560» в челюстно-лицевой области относится к 1985 году [4]. За тридцать лет с момента первого сообщения об успешном применении роботов в стоматологии в патентном и литературном поле сформировались основные требования, которым должны соответствовать данные устройства [5].

1. Наличие эффективного управления – робот должен во всех конфигурациях обеспечивать контроль за движением инструмента с использованием схем отслеживания скорости и сил, обеспечивая безопасность пациента. При работе в автоматическом режиме механотронного устройства хирург может вмешаться на любом этапе оперативного вмешательства.

2. Возможность постоянного контроля за вмешательством – сила, создаваемая механотронным устройством, должна иметь безопасный диапазон. При автономном режиме работы усилие, создаваемое роботом на операционное поле, должно адекватно тактильно передаваться руке оператора.

3. Бесперебойность работы – сохранение положения инструмента в запланированном положении, когда источник питания потерян или произошел сбой программы.

4. Безопасность вмешательства – при движении механотронного устройства оно должно автоматически избегать прохождения вблизи важных анатомических объектов.

5. Наличие стерильности – механотронные устройства должны либо стерилизоваться, либо герметично закрываться стерильными чехлами с целью предупреждения инфицирования раны.

Анализируя современное состояние данного вопроса, можно заключить, что основная масса стоматологических робот-ассистированных систем представляет собой промышленные манипуляторы, адаптированные к стоматологии [6]. Ряд авторов отмечают, что отдельные серийно выпускаемые роботы не могут достичь высокого уровня точности, в связи с чем от дальнейшего применения их в стоматологической практике стоит отказываться в пользу узкоспециализированных роботов. К другим недостаткам серийно выпускаемых механотрон-

ных устройств можно отнести повышенные габариты и вес устройств, которые зачастую усложняют проведение операции. Вышеперечисленные недостатки побудили разработчиков вести поиск новой архитектуры узкоспециализированных механотронных устройств, применяемых в стоматологической практике [7]. Узкоспециализированные робот-ассистированные и роботизированные стоматологические устройства в литературе встречаются крайне редко.

В стоматологии наибольшее распространение получили три архитектуры роботов: последовательная, параллельная и контурная. Последовательная архитектура представляет собой «кинематическую руку – манипулятор», состоящий из серии последовательных балок, соединенных между собой узлами-двигателями. На завершающем участке кинематической конструкции неподвижно закрепляется стоматологический инструмент.

Параллельная архитектура отличается наличием двух плоскостей, соединенных серией микролифтов, приводимых в движение шаговыми двигателями. На одной из плоскостей манипулятора неподвижно закрепляется стоматологический инструмент. Из двух архитектур роботов (последовательная и параллельная) с фундаментальными требованиями медицины наиболее совместимы роботы с параллельной архитектурой. В отличие от громоздкой последовательной архитектуры, компактная и легкая параллельная архитектура упрощает расположение робота в операционной, экономит необходимое рабочее пространство и позволяет легко готовить устройство к работе посредством упаковки его стерильными чехлами. Относительно небольшие размеры работы параллельной компоновки позволяют обеспечить важную функцию – безопасность. Поэтому основная масса исследователей сосредоточили свое внимание на изучении возможностей параллельных роботов в стоматологической практике [8].

Ряд авторов предлагают автоматизировать стоматологическое вмешательство с применением контурных станков с числовым программным обеспечением. Контурные станки с числовым программным обеспечением – это устройства, позволяющие перемещать стоматологический инструмент относительно операционного поля в соответствии с преоперационным планом, записанным в управляющей программе. Такая конструкция робот-ассистированных систем позволяет сохранить высокую точность работы при значительно меньших размерах и весе [9]. В связи с этими положительными свойствами мы обратили особое внимание на контурные ЧПУ-станки при разработке нашего оборудования.

В 2016 году впервые была предложена классификация механотронных устройств, применяемых в челюстно-лицевой области [10].

1. Робот-ассистированные системы, управляемые дистанционно, представляют собой комплекс механотронных и электронно-вычислительных элементов, связанных в единую систему и не имеющих автономности. В их число входят дистанционные робот-ассистированные системы, обладающие эффектом телеприсутствия. Также к данным системам относятся учебные механотронные фантомы.

2. Полуавтоматические робот-ассистированные системы: в процессе выполнения работы часть рядовых поставленных задач по оперативному вмешательству реализуется устройством, а наиболее сложные – врачом. Данная функция упрощает оперативное вмешательство.

3. Полностью автономные системы способны к автономному выполнению операции без помощи человека. Данные устройства не способны принимать решения во внештатных ситуациях. За процессом работы устройства врач проводит наблюдение. В случае возникновения внештатных ситуаций врач вмешивается в ход выполняемого оперативного вмешательства.

4. Роботизированные системы с элементами искусственного интеллекта являются полноценными роботами. Способны самостоятельно поставить и выполнить задачу. При сложившейся экстренной ситуации во время операции самостоятельно принимают верное решение. Обладают элементами искусственных нейронных сетей. Способны к самообучению и накоплению полученных знаний.

Робот-ассистированные системы, управляемые дистанционно, и полуавтоматические робот-ассистированные системы, а также полностью автоматические не способны самостоятельно поставить точный, независимый диагноз, рекомендовать план будущего лечения или определить объем и глубину вмешательства.

Основной отличительной особенностью медицинских роботизированных систем является наличие искусственного интеллекта в виде нейронных сетей, которые помогают принять своевременное и правильное решение в сложной сложившейся клинической ситуации и на его основании совершить верное действие. В этом выражаются автономность роботов и их принципиальное отличие от робот-ассистированных, полуавтоматических и полностью автономных систем [10].

Проведенный анализ литературных источников позволил нам предложить классификацию назначения механотронных систем в стоматологии: обучающие механотронные устройства, которые позволяют накапливать мануальные навыки у обучающихся; сервисные механотронные устройства – системы, позволяющие производить контроль документооборота в медицинских учреждениях, осуществлять наблюдение и контроль тяжелых стационарных больных; клинические механотронные устройства – системы, осуществляющие оперативное вмешательство.

В 2016 году впервые проведен эксперимент по автоматическому одонтопрепарированию с применением робота со встроенным лазерным генератором с ультракороткой длиной волны [11]. Авторы в рамках эксперимента объединили «селективное» препарирование твердых тканей зуба с механотронным устройством. Разработчики реализовали концепцию внутриротового расположения автоматизированного устройства. Назубный участок устройства представлял собой прямоугольный металлический «корпус-каппу» (15 × 15 × 20 мм), который неподвижно фиксировался относительно препарлируемого зуба. К внутриротовой части устройства неподвижно закреплялся световод генератора лазерного излучения. Внутри «корпуса-каппы» располагалась одна фокусирующая линза, направляющая лазерный луч в 6 степенях свободы на ткани зуба в соответствии с планом препарирования. Толщина одного слоя препарирования, реализуемая устройством, составляла 46 мк, точность шага – 1 мк. Средняя погрешность «селективного» препарирования поверхностей зуба с применением данного устройства составила 0,097 мм, при этом средняя погрешность угловых отклонений составила менее 1 град.

Время препарирования с устройством в среднем составляло 17 мин.

С целью снижения влияния человеческого фактора на качество эндодонтического лечения была разработана внутриротовая робот-ассистированная система [12].

Она представляла собой каппу размером 20 × 20 × 28 мм, имеющую седлообразную основу с опорными кронштейнами, неподвижно закрепленными на зубах в полости рта. Грани каппы были сглажены таким образом, чтобы риск повреждения слизистой оболочки полости рта был сведен к минимуму. На ней располагались три рентгеноконтрастных опорных точки для определения системы координат станка относительно зубного ряда. Для определения пространственного положения устройства относительно зубного ряда проводилось рентгенологическое исследование.

Рабочая часть, содержащая привод эндодонтического инструментария, передвигалась в мезио-дистальном направлении по двум опорным кронштейнам, расположенным на зубном ряду.

Микрошаговые двигатели, расположенные в рабочей части, использовались для обеспечения движения в пяти степенях свободы эндодонтического инструментария. Диапазон передвижения по оси X составлял 5 мм, по оси Y – 4 мм, по оси Z – 25 мм. Угловые перемещения эндодонтического инструмента по осям X, Y, Z составляли ± 12°. Максимальное усилие, оказываемое устройством на эндодонтический инструмент, составляло 4,9 Н. Каждый привод независимо управлялся ЧПУ-контроллером. В конструкцию устройства входили ирригационная система и система вакуум-аспирации для удаления зубной пыли и отработанной жидкости. Устройство было снабжено фиброоптическим освещением.

Устройство в автоматическом режиме выполняло зондирование, прохождение, очистку и заполнение корневых каналов. При отклонении от выбранного плана лечения врач корректировал либо останавливал ход работы.

Ни движения головы, ни движения челюстей не влияли на точность работы устройства.

В 2017 году специалистами ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» и МГМСУ им. А.И. Евдокимова впервые в России в стоматологическом эксперименте был применен серийно выпускаемый промышленный кинематический манипулятор «KUKA LBR4+». Устройство позволило производить вмешательство в семи степенях свободы с допустимой погрешностью ± 0,05 мм. Устройство представляло собой последовательно соединенную кинематическую конструкцию [13]. В рамках эксперимента было определено, что поддержание заданной скорости движения рабочего инструмента при проведении вмешательства более точное (в 4 раза), отклонение от заданной траектории лучше в 3,3 раза по сравнению с работой человека. Авторы отнесли полученные погрешности в случае работы хирурга к негативному влиянию человеческого фактора. Было подтверждено, что погрешности, возникшие при работе автоматизированной системы (МХК), возникли из-за неточности конструкции и накопления нежелательных погрешностей [14].

Компания «Neocis Inc.» (США) впервые реализовала автоматизированную установку имплантатов в рамках эксперимента в клинической практике. Во время использования устройства врач удерживал манипулятор, направлял его в выбранное место на челюсти и давал указание для окончательной установки имплантата. Этот способ контроля носит определение «soft robotics» или «hands-on robots». Описанный принцип реализован в автоматизированной системе «YOMI» [15], [16].

В 2016 году была предложена роботизированная система для позиционирования дентальных имплантатов. В связи с тем, что устройство обладало элементами искусственной нейронной сети, его можно отнести к роботизированным системам. Устройство включало в себя две кинематические конструкции, одна из которых была оснащена наконечником физиодispensера, а вторая неподвижно фиксировалась относи-

тельно челюсти, в которую устанавливался дентальный имплантат. Устройство позволяло в автоматическом режиме отслеживать траекторию перемещения челюсти, в которую устанавливается имплантат, и одновременно производить его установку [17].

В 2018 году впервые в мире китайскими учеными была разработана и внедрена в клиническую практику роботизированная платформа дентальной имплантации. Она включала в себя промышленный робот-манипулятор (адаптированный под медицинские цели) с несколькими кинематическими звеньями. Благодаря наличию элементов искусственной нейронной сети устройство способно анализировать свойства костной ткани (онлайн режим), в которую устанавливается имплантат, и контролировать усилие, с которым он устанавливается [18].

Перед операцией, в соответствии с клинической картиной на КТ-снимке, выбирались позиция и глубина установки имплантата, полученные данные загружались в контроллер устройства. Относительно устройства производилась калибровка положения головы пациента. Контроль передвижения головы пациента относительно устройства обеспечивался неподвижно фиксированным видеотрекером, расположенным на челюсти пациента и наконечнике физиодispensера. В процессе работы робот-ассистированной системы одновременно за двумя маркерами наблюдало «роботизированное зрение», которое обеспечивало обратную связь между роботом и пациентом. При такой архитектуре устройства во время операции не требовалось неподвижной фиксации головы пациента. Во время непосредственной установки имплантата система фиксировала любое перемещение головы пациента и соответственно этому в автоматическом режиме совершала соразмерное движение в ее сторону, компенсируя негативное влияние человеческого фактора. За ходом всей операции наблюдал врач-имплантолог и при отхождении робот-ассистированной системы от предоперационного плана останавливал операцию либо вносил поправки в операционный процесс [19].

В конструкцию робота были включены датчики изменения положения кинематических участков манипулятора. В данном устройстве для измерения положения робот-ассистированных систем применялись оптические, магнитные датчики, а также датчики с эффектом Холла. На базе Института робототехники и электроники Германского аэрокосмического центра была разработана система обратной связи, препятствующая нанесению травмы пациенту или оперирующему хирургу [1].

Взаимосвязь между автоматизированной системой и человеком возможна посредством джойстиков или сенсорных панелей [20].

Система «Da Vinci» в реальном времени отслеживала естественные движения операционной области. Одновременно с этим осуществлялась корреляция движений манипулятора с движениями операционного поля (обратная связь «машина-пациент»).

Органами управления робот-ассистированной хирургической системы «Da Vinci» являлся пульт 3D-визуализации, на экран которого проецировалось трехмерное изображение операционного поля. В состав управляющего пульта автоматизированной системы входил ряд джойстиков, позволяющих управлять манипуляторами: первые два выполняли функцию режущего инструмента, третий был оборудован видеокамерой, четвертый выполнял роль ассистента. Конструкция каждого манипулятора представляла собой последовательно соединенные кинематические конструкции. Система «Da Vinci» позволяла нивелировать естественный физиологический тремор руки хирурга. В литературе отмечен опыт применения «трансoralной роботизированной хирургии» (Transoral Robotic Surgery – TORS) с применением «Da Vinci» при лечении онкологических заболеваний ЛОР-органов [21].

На заседании РАН, прошедшем 14 марта 2018 года, главным внештатным стоматологом О.О. Янушевичем было предложено новое направление «Здравоохранение 4.0», в основе

которого будет заложена концепция автоматизации оказания оперативной помощи с применением цифровых роботизированных платформ, обладающих элементами искусственного интеллекта.

Роботизированные системы, по мнению О.О. Янушевича, имеют ряд преимуществ как для врача, так и для пациента.

Преимуществами роботизированных систем для больного являются: эффективная диагностика на ранних стадиях развития заболевания; сокращение времени выполнения оперативных вмешательств в 2-3 раза; минимальный радикализм оперативного вмешательства, осуществляемого роботом; точность операций, выполняемых роботизированной системой, на 30 % выше по сравнению с обычным оператором.

Преимущества роботизированных систем для врача: в руках врача появляется многофункциональная диагностико-хирургическая платформа, позволяющая в кратчайшие сроки сформировать точный диагноз и назначить план оперативного лечения; применение роботов, составляющих основу диагностико-хирургической платформы, позволяет производить хирургическое вмешательство с точностью до 0,1 мм.

Реализация проекта «Здравоохранение 4.0» включает в себя 5 этапов.

1. На настоящее время имеются прототипы робот-ассистированных систем в челюстно-лицевой хирургии и других отраслях медицины.

2. К 2019 году планируются создание первого прототипа цифровой роботической платформы, цифровое планирование операций, сертификация роботизированных систем.

3. В 2021 году будет реализовано первое клиническое применение цифровой роботической платформы.

4. До 2023 года предполагается создание прототипа «умной операционной», объединяющего диагностические и роботизированные платформы.

5. К 2025 году планируется создание «умной операционной» и серийное ее внедрение в практическое здравоохранение («Здравоохранение 4.0») [22]. Исходя из изученных литературных данных понятно, что возможность создания роботизированной системы, а также цифровой роботизированной платформы сопряжена с трудностями, так как нет научной базы в мировой практике для создания искусственного интеллекта.

Можно заключить, что робот-ассистированные системы на фоне появления новых материалов будут продолжать свое дальнейшее развитие и станут более компактными, точными, при этом скорость оперативного лечения будет возрастать.

По нашему мнению, развитие робот-ассистированных и роботизированных систем должно включать в себя усовершенствование методов интраоперационной визуализации, средств диагностики, совершенствование хирургического инструментария, а также появление новых роботизированных разработок. Мы предполагаем, что будущее медицинских операционных технологий за механотронными и роботизированными устройствами, однако применение данных систем требует рационального подхода. Применение этого оборудования оправдано только в том случае, когда невозможно или значительно затруднено проведение операции врачом. По нашему мнению, к таким направлениям могут быть отнесены: высокоточное препарирование опорных зубов под несъемные ортопедические конструкции, прецизионное одонтопрепарирование в терапевтической стоматологии, установка дентальных имплантатов в сложных клинических условиях, а также при сложных реконструктивных операциях в челюстно-лицевой области.

#### Список литературы:

1. Буйнов М.А., Воротников А.А., Климов Д.Д., Мальшев И.Ю., Миронов В.А., Парфенов В.А., Перейра Д.А.С., Подураев Ю.В., Хесуани Ю.Д. Роботические технологии в медицине и биопринтинге: состояние проблемы и современные тенденции // Вестник МГТУ «Станкин». 2017. № 1 (40).

2. *Подураев Ю.В.* Подход и опыт проектирования медицинской коллаборативной робототехники для лазерной хирургии и биопринтинга // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 11. С. 749-752.
3. *Туркина Н.В.* Робот-ассистированные операции // Медицинская сестра. 2017. № 6. С. 11-14.
4. *Микешина К.Н.* Достижения и проблемы роботизированной медицины / В сб.: Юриспруденция, история, социология, политология и философия. Сборник статей по материалам VII Международной заочной научно-практической конференции «Научный форум: юриспруденция, история, социология, политология и философия». 2017. С. 43-47.
5. *Мифтахова А.А., Бондаренко Е.В.* Интеллектуальные роботы в медицине // Актуальные проблемы современной науки. 2018. № 1 (98). С. 32-35.
6. *Федоров А.Ю., Соснина Н.Г.* Робототехника: удобство и безопасность / Материалы XX Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов. В 8 частях. 2017. С. 236-239.
7. *Рыбаков С.В., Фомкина С.А., Бабаева А.А.* Инновационные технологии в хирургии / В сб.: Состояние и перспективы развития инновационных технологий в России и за рубежом. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в образовании и науке». 2018. С. 258-262.
8. *Добриборщ Д.В., Колобин С.А.* Адаптивное управление роботом-манипулятором с параллельной кинематической схемой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 9. С. 850-857.
9. *Семенов Д.К.* Способ особо точной обработки зубов и портативная установка с дистанционным управлением малогабаритного устройства для обработки зубов / Патент РФ на изобретение. RUS2443396. 14.10.2012.
10. *Keisner A., Raffo J., Wunsch-Vincent S.* Robotics: Breakthrough Technologies, Innovation, Intellectual Property // Foresight and STI Governance. 2016. Vol. 10. № 2. PP. 7-27.
11. *Peijun Lv, Yong Wang, Yuchun Sun, Dangxiao Wang, Wenqi Ge, Ning Dai, Yongbo Wang* Method and apparatus for tooth and tooth retainer / Patent US 20160367336A1/2016. 24.05.2016.
12. *Janet Dong, Shane Hong, Gannar Hesselgren* A Study on Development of Endodontic Micro Robot / Proceedings of the 2006 IJME – INTERTECH Conference. 2006. PP. 16-19.
13. *Подураев Ю.В.* Подход и опыт проектирования медицинской коллаборативной робототехники для лазерной хирургии и биопринтинга // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 11. С. 749-752.
14. *Чунихин А.А., Подураев Ю.В., Воротников А.А., Климов Д.Д., Саакян М.Ю., Базикян Э.А.* Оценка эффективности наносекундной лазерной роботизированной хирургии при проведении малоинвазивных операций челюстно-лицевой области в эксперименте // Современные технологии в медицине. 2017. Т. 9. № 4. С. 123-130.
15. *Suttin Z., Porter S.* Robotic device for dental surgery / Patent US 201603541 69A1. 2016. 01.01.2016.
16. *Mozes A., Beach M., Salcedo J., Ganeles J.* Surgical robot system for integrated surgical planning and implant preparation, and associated method / Patent US 20160367343A1. 2016. 22.12.2016.
17. *Suttin Z., Porter S.* Surgical guides and methods for positioning artificial teeth and dental implants / Patent US 201603541. 2016. 16.11.2016.
18. *Porter S.* Intelligent robot system used for oral implantology surgeries / Patent US CN107582193A. 2018. 15.09.2017.
19. *Chuanbin Guo, Jiang Deng, Xingguang Duan, Li Chen, Xiaojing Liu* Development of a robot-assisted surgery system for cranio-maxillofacial surgery // Interface Oral Health Science. 2017. № 29. PP. 65-71.
20. *Ablyazizova D., Trofimova T.* Innovations in medicine / В сб.: Достижения и перспективы инноваций и технологий. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под ред. Т.Г. Клепиковой, А.Г. Михайловой и др. – ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2016. С. 209-214.
21. *Кропотов М.А., Мосин С.В., Петрова А.Л., Черникова Е.Н.* Первый опыт трансоральной роботизированной операции при раке ротоглотки (клиническое наблюдение) // Опухоли головы и шеи. 2017. Т. 7. № 2. С. 106-110.
22. *Янушевич О.О.* Роботов – в работу! Заложена платформа медицины будущего // Наука. 2018. № 11-12. С. 5-6.

*Александр Валериевич Иващенко,*  
*д-р мед. наук, ассистент,*  
*кафедра ортопедической стоматологии,*  
*Игорь Михайлович Федяев,*  
*д-р мед. наук, профессор,*  
*Алексей Евгеньевич Яблоков,*  
*клинический ординатор,*  
*кафедра ЧЛХ и хирургической стоматологии,*  
*ФГБОУ ВО «Самарский государственный*  
*медицинский университет» Минздрава России,*  
*Дмитрий Витальевич Кондрашин,*  
*аспирант,*  
*кафедра конструирования и производства*  
*радиоэлектронных средств,*  
*ФГАОУ ВО «Самарский национальный*  
*исследовательский университет*  
*им. акад. С.П. Королева»,*  
*Людмила Савельевна Целкович,*  
*д-р мед. наук, профессор,*  
*зав. кафедрой акушерства и гинекологии № 2,*  
*Мукатдес Ибрагимович Садыков,*  
*д-р мед. наук, профессор,*  
*кафедра ортопедической стоматологии,*  
*ФГБОУ ВО «Самарский государственный*  
*медицинский университет» Минздрава России,*  
*г. Самара,*  
*e-mail: s1131149@yandex.ru*

\* \* \* \* \*