



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений .....	9
Введение (О.О. Янушевич) .....	10
<b>ГЛАВА 1. Медицинская робототехника – новое медико-технологическое направление науки и техники (Ю.В. Подураев).</b> .....	<b>15</b>
1.1. Цели создания и междисциплинарная структура медицинской робототехники. ....	15
1.2. Актуальные тренды развития современной робототехники и научно-техническая проблематика для медицинских роботов .....	19
1.3. Интеллектуальное управление в медицинской робототехнике .....	28
Список литературы .....	37
<b>ГЛАВА 2. Современные роботомедицинские системы и технологии.</b> .....	<b>39</b>
2.1. Роботизированные технологии в общей хирургии (Д.Н. Панченков, Р.В. Лискевич) .....	39
2.1.1. Симбиоз инженерной мысли и медицины .....	40
2.1.2. Колоректальная хирургия: специальность, открывшая путь .....	42
2.1.3. Гепатобилиарная и панкреатическая хирургия: нет ничего невозможного .....	44
2.1.4. Хирургическая онкология желудка: совершенство обретает форму. ....	46
2.1.5. Бариатрическая и антирефлюксная хирургия: самые молодые области развития. ....	47
2.1.6. Эндокринная хирургия: робототехника в необычном месте приложения .....	48
2.1.7. Холецистэктомия: первая ступень в начале долгого пути. . .	50
2.1.8. Пластика грыж: двигатель развития и совершенствования методик .....	51

2.1.9. Роботизированная общая хирургия: инновации невозможно остановить . . . . .	53
Список литературы . . . . .	55
2.2. Разработка хирургической роботизированной системы для применения в челюстно-лицевой хирургии (Э.А. Базикян, А.А. Чунихин) . . . . .	59
Введение . . . . .	59
2.2.1. Подсистема «Автоматизированный манипуляционный робот-хирург». Прототип автоматизированного устройства смены медицинского рабочего инструмента . . . . .	69
2.2.1.1. Переходник МРИ с эндоскопической камерой . . . . .	70
2.2.2. Подсистема «Место пациента». Прототип специализированной оснастки, фиксирующей фантом головы пациента . . . . .	71
2.2.2.1. Фантомы головы и челюсти пациента . . . . .	71
2.2.2.2. Специализированная оснастка, фиксирующая фантом головы пациента . . . . .	72
2.2.3. Подсистема «Мануальный тренажерный комплекс» . . . . .	73
2.2.4. Подсистема «Рабочее место хирурга». Описание прототипа интеллектуальной системы принятия решений по выбору режимов работы мультифункционального хирургического комплекса . . . . .	76
2.2.5. Проведение экспериментальных исследований для получения количественной оценки сравнения траекторий, проводимых врачом-хирургом, и траекторий, проводимых роботом . . . . .	77
2.2.5.1. Критерии сравнения траекторий движения робота и мануальных перемещений врача для выполнения челюстно-лицевых хирургических операций . . . . .	78
2.2.5.2. Набор типовых траекторий и процесс получения экспериментальных данных . . . . .	79
2.2.5.3. Критерий I. Стандартное отклонение точек от линейной (полулунной, фестончатой) траектории – величина отклонения в каждой точке от ее проекции на среднюю линию (модель), построенную по методу наименьших квадратов. . . . .	81

2.2.5.4. Критерий II. Погрешность величины воздушного зазора между наконечником лазера и обрабатываемой биологической тканью. Разница между измеренным значением воздушного зазора и заданным . . . . .	87
2.2.5.5. Критерий III. Среднеарифметическое относительной погрешности скорости реза и погрешность средней скорости реза на каждом проходе медицинского рабочего инструмента. Разница между измеренным значением скорости на проходе и заданным . . . . .	93
2.2.5.6. Критерий IV. Стандартное отклонение от средней скорости – величина отклонения от средней скорости движения. Характеризует качество удержания величины текущей скорости реза. . . . .	103
2.2.5.7. Рекомендации и предложения по использованию результатов НИР . . . . .	110
Закключение . . . . .	110
Список литературы . . . . .	111
2.3. 3D-биопечать живых органов и тканей (И.Ю. Малышев). . . . .	113
Введение . . . . .	113
2.3.1. 3D-биопечать: компоненты технологии. . . . .	114
2.3.1.1. Предпроцессинг – создание цифровой модели ткани и подготовка биочернил. . . . .	115
2.3.1.2. Процессинг – создание объемного биологического аналога органа или ткани . . . . .	120
2.3.1.3. Постпроцессинг – созревание ткани в биореакторе и имплантация . . . . .	124
2.3.2. 3D-биопечать: биофабрикация функциональных тканей и органов . . . . .	124
2.3.2.1. Сосудистая сеть . . . . .	124
2.3.3. Новые тенденции в биопечати: биопечать <i>in situ</i> . . . . .	136
2.3.3.1. Биопечать <i>in situ</i> кожи, костных тканей и хряща . . . . .	137
2.3.3.2. Биопечать <i>in situ</i> тканей зуба . . . . .	140
2.3.4. Проблемы и перспективы 3D-биопечати в клинической практике . . . . .	142
Список литературы . . . . .	143

2.4. Робот-ассистированная хирургия в урологии ( <i>Д.Ю. Пушкарь, К.Б. Колонтарев</i> ) . . . . .	146
Введение . . . . .	146
2.4.1. Определение . . . . .	146
Da Vinci 2000 и Da Vinci S . . . . .	152
Da Vinci Si . . . . .	153
Da Vinci Xi . . . . .	153
Senhance Surgical Robotic System . . . . .	155
Versius robotic system (CMR surgical, Cambridge, UK) . . . . .	156
2.4.2. Робот-ассистированная радикальная простатэктомия . . . . .	158
2.4.3. Робот-ассистированная резекция почки . . . . .	163
2.4.4. Робот-ассистированная радикальная цистэктомия . . . . .	165
2.4.5. Отечественный хирургический робот-ассистирующий комплекс для выполнения операций в урологии . . . . .	167
Ожидаемые технико-экономические показатели . . . . .	168
Список литературы . . . . .	169
2.5. Современные роботизированные медицинские системы и технологии. Нейрохирургия позвоночника ( <i>В.В. Крылов, А.А.Гринь, А.Ю. Кордонский</i> ) . . . . .	175
Введение . . . . .	175
2.5.1. Робот Mazor 9 . . . . .	176
2.5.2. Робот Brainlab Cirq . . . . .	179
2.5.3. Медико-технологические параметры медицинских роботов . . . . .	181
2.5.4. Конструкция и система управления многофункционального устройства для измерения сил и моментов при нейрохирургии позвоночника . . . . .	181
2.5.5. Алгоритмическое сопровождение многофункционального устройства . . . . .	183
2.5.6. Лабораторные эксперименты с фантомами позвоночника Sawbones . . . . .	185
2.5.7. Заключение . . . . .	190
Список литературы . . . . .	191

2.6. Роботизированные системы в нейрохирургии головного мозга ( <i>О.В. Левченко</i> ) . . . . .	192
2.6.1. Телехирургический робот (ведущий-ведомый) . . . . .	194
2.6.2. Направляющий автономный робот. . . . .	198
2.6.3. Основные тренды развития робототехники в нейрохирургии . . . . .	202
Список литературы . . . . .	203
2.7. Понятия и различия реальностей: виртуальная, дополненная и смешанная ( <i>И.В. Семенякин</i> ) . . . . .	204
2.7.1. Виртуальная реальность (virtual reality) . . . . .	204
2.7.2. Дополненная реальность (augmented reality) . . . . .	205
2.7.3. Смешанная реальность (mixed reality) . . . . .	205
2.7.4. Основные типы устройств. . . . .	206
2.7.5. Применение виртуальной реальности. . . . .	207
2.7.6. Применение виртуальной реальности в медицине . . . . .	208
2.7.7. Разработка приложений смешанной реальности . . . . .	210
Список литературы . . . . .	213
2.8. Экзоскелеты ( <i>Е.В. Письменная</i> ) . . . . .	215
2.8.1. Экзоскелеты для реабилитации. Экзорехабилитация. . . . .	215
Описание экзоскелетов. . . . .	216
Что такое экзоскелет EхоAtlet. . . . .	216
Выбор типа голенного звена для ходьбы в экзоскелете . . . . .	226
Размещение и обучение пациентов. . . . .	228
2.8.2. Инсульт . . . . .	229
Общие показания . . . . .	231
Критерии включения . . . . .	231
Критерии исключения . . . . .	231
Применение устройства «ЭкзоАтлет» . . . . .	233
Выводы по наблюдениям, сделанным по группе пациентов. . . . .	269
Список литературы . . . . .	270

2.8.3. Клинико-биомеханическое обоснование применения медицинского экзоскелета EхоAtlet Bambini Mini и первый опыт проведения реабилитации с его использованием .....	274
Описание параметров тренировок в экзоскелете EхоAtlet Bambini MINI и клиническая оценка результатов .....	280
Оценка основных параметров ходьбы .....	281
Оценка биомеханических параметров ходьбы с использованием лечебно-измерительного комплекса оценки эффективности реабилитации «ЛИКЭР» .....	291
2.8.4. Выводы .....	336
Список литературы .....	336
<b>ГЛАВА 3. Системы управления в медицинской робототехнике (Ю.В. Подураев, А.А. Воротников, Д.Д. Климов) ..</b>	<b>338</b>
3.1. Структура и основные компоненты систем управления медицинскими роботами .....	338
3.2. Программно-математическое обеспечение и компьютерное моделирование медицинских роботов .....	349
3.2.1. Подходы к построению программного обеспечения медицинских роботов .....	349
3.2.2. Архитектура программного обеспечения медицинских роботов .....	352
Список литературы .....	355
<b>ГЛАВА 4. Роботика и интеллектуальная робототехника в медицине (круглый стол) .....</b>	<b>357</b>

# Глава 1

## Медицинская робототехника — новое медико-технологическое направление науки и техники

### **1.1. ЦЕЛИ СОЗДАНИЯ И ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРНАЯ СТРУКТУРА МЕДИЦИНСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ**

Медицинская робототехника — это новое медико-технологическое направление науки и техники, предметная область которой формируется путем синергетики знаний и современных технологий трех базовых областей — высокотехнологичной медицины, интеллектуальной робототехники и биотехнологий.

Важно отметить, что в течение многих десятилетий перечисленные сферы деятельности развивались весьма обособленно как в науке и образовании, так и в практических приложениях. Уровень сложности и предметной новизны задач, которые стоят перед медицинской робототехникой, потребовали создания и применения оригинальных подходов решения системных проблем на междисциплинарных стыках базовых фундаментальных областей. При этом ведущая роль в становлении и развитии медицинской робототехники принадлежит методам интеллектуализации и цифровизации ключевых технологий и систем, которые положены в основу современной научно-технической политики Российской Федерации.

Целью медицинской робототехники является повышение качества лечения пациентов на этапах исследования и диагностики, при выполнении медицинских операций и хирургических вмешательств путем системного сочетания медицинских, робототехнических и биологических методов. При этом достигается ряд следующих лечебных и социально-экономических эффектов [1]:

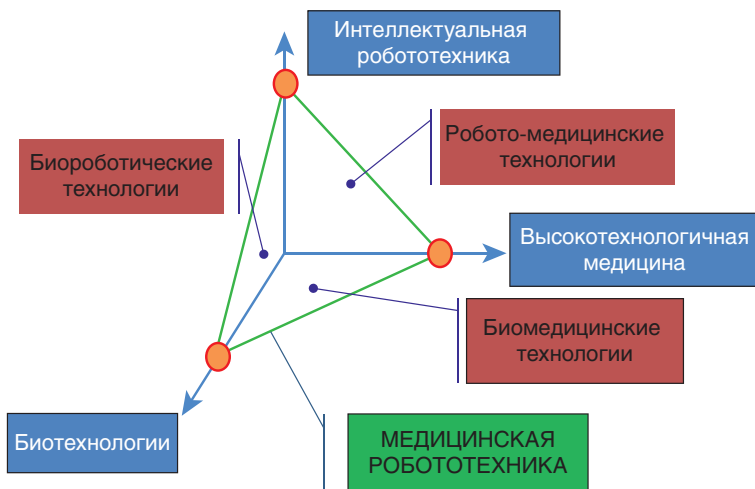
- ранняя диагностика заболеваний, в том числе путем применения цифровой обработки и компьютерного анализа показаний медицинских приборов и визуализации изображений;
- малая инвазивность хирургии и снижение интраоперационной кровопотери благодаря проведению хирургических вмешательств с минимальным повреждением структуры здоровых тканей и минимальным нарушением их функций;
- сокращение времени выполнения операций вследствие высокоточных методов позиционирования, интеллектуального планирования и навигации движения медицинских инструментов;
- удобство работы и снижение утомляемости врачей и медицинского персонала, практическое исключение мануальных врачебных ошибок;
- высокий уровень 3D-визуализации операционного поля и видеографики движений медицинских инструментов;
- сокращение времени госпитализации и реабилитации пациентов после сложных операций за счет снижения инвазивности процедур и повышения точности роботизированных манипуляций;
- диагностика и контроль критически важных параметров состояния пациента в реальном времени при хирургическом вмешательстве.

Основной целью коллаборации робототехники и медицины является повышение эффективности лечения и уменьшение рисков нанесения вреда здоровью пациентов при выполнении обследований и хирургических вмешательств. Поставленная цель достигается через целенаправленный научно-технический поиск интеллектуальных роботизированных систем и технологий, позволяющих принципиально превзойти возможности естественных систем человека путем роботизированного выполнения медицинских операций.

Следовательно, и медико-роботизированные системы надо воспринимать как интеллектуальный медицинский инструментарий, функциональные возможности которого используются исключительно в рамках плана лечения, ограничительных условий и полного контроля со стороны врачей и медперсонала.

Интердисциплинарный предмет медицинской робототехники (МР) определяет системный характер ее структуры. Это означает понимание медицинской робототехники как целостной системы как с точки зрения структурных компонентов в их взаимосвязи, так и по применяемым медицинским, роботизированным и биотехническим технологиям.

Основные структурные компоненты МР и взаимодействие между ними можно наглядно проиллюстрировать в виде цветовой графической модели «Пирамида медицинской робототехники» (рис. 1.1).



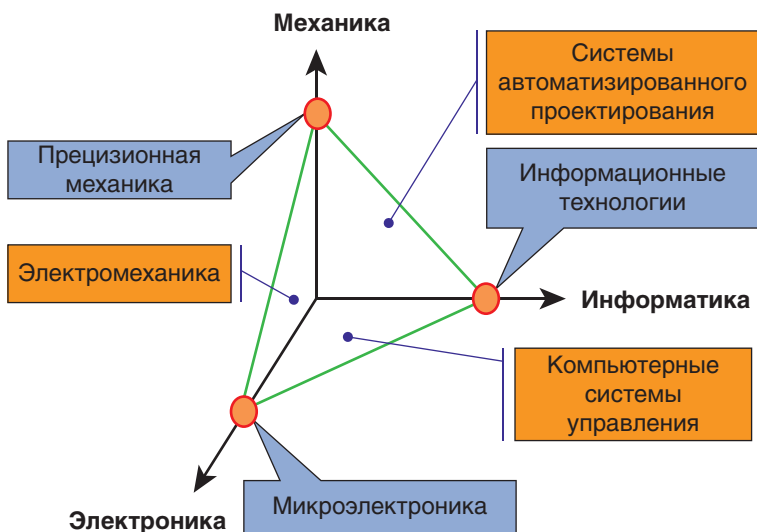
**Рис. 1.1.** Структурная модель «Пирамида медицинской робототехники»

Три базовых направления развития современной медицинской робототехники графически представлены как координатные векторы. К ним отнесены три фундаментальные области: высокотехнологичная медицина, интеллектуальная робототехника и биотехнологии. Безусловно, достигнутый высокий уровень развития базовых областей позволил сегодня ставить и успешно решать научные и практические задачи по созданию и внедрению МР.

Отметим, что каждая из трех указанных областей в свою очередь является междисциплинарной системой. Например, современная мехатроника (рис. 1.2) построена путем интеграции прецизионной механики, микроэлектроники и информационных технологий, реализующих компьютерное проектирование и управление роботами, в том числе с использованием методов искусственного интеллекта [2].

Подчеркнем, что в мехатронике структурные взаимосвязи элементов разной физической природы (механических, электротехнических, программных, сенсорных и т.д.) дали толчок к разработке и применению мехатронных (по сути, гибридных) технологий. Подробнее вопросы проектирования и программирования современных роботов рассмотрены в разделе 1.2 и главах 2 и 3.

Предложенная модель «Пирамида медицинской робототехники», несмотря на очевидную схематичность, позволяет показать основные этапы становления МР как междисциплинарной медико-технологической области науки и пути ее дальнейшего развития.



**Рис. 1.2.** Структурная модель «Пирамида мехатроники»

На первом этапе формирования МР происходил поиск точек взаимодействия между тремя базовыми направлениями (координатные оси на рис. 1.1), как правило, в инициативном порядке. В первую очередь это относится к фундаментальной науке и образованию, когда ведущие ученые и затем и практики все чаще стали применять решения, полученные в других предметных областях. В медицине этот процесс активно стимулировался разработкой и внедрением в клиническую практику нового поколения медицинских устройств, построенных на базе новой информационной и компьютерной техники.

Второй этап становления медицинской робототехники — это появление дуальных технологических областей, которые графически показаны как три боковые грани модели «Пирамида медицинской робототехники» (см. рис. 1.1). Данными гранями являются роботомедицинские, биомедицинские и биороботизированные технологии. Отметим, что все перечисленные дуальные технологические области базируются на современных цифровых и интеллектуальных технологиях получения, обработки и хранения информации.

Главным содержанием второго этапа развития является появление международных и национальных проектов по медико-технологической тематике и открытие ведущими университетами междисциплинарных образовательных программ. Практическая реализация научно-исследо-

вательских проектов и появление нового поколения специалистов способствуют активному внедрению МР в клиническую практику. На этом этапе, начиная с 2000-х гг., на мировом рынке появились серийно выпускаемые модели медицинских роботов.

Мы предполагаем, что технологический прорыв в области медицинской робототехники произойдет на третьей решающей стадии ее развития. На этом этапе в научной, образовательной и организационной сферах путем синергетической интеграции трех дуальных направлений будут созданы медико-технологические платформы, которые позволят расширить спектр прикладных систем для конкретных медицинских областей. Подробно вопросы о состоянии медицинской робототехники в мире и примеры современных роботомедицинских систем, разработанных и внедренных в отечественные клинические центры, рассмотрены в главах 2 и 3.

## **1.2. АКТУАЛЬНЫЕ ТRENДЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМАТИКА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ РОБОТОВ**

В этом разделе мы рассмотрим тренды развития современной робототехники, которые формируют актуальные проблемы и задачи в том числе и для медицинских роботов. Каждый из приведенных ниже трендов придает роботам принципиально новые свойства и модели поведения.

Выделим пять ключевых трендов развития современной робототехники.

1. Рекордные темпы развития сервисной робототехники в мире по сравнению с традиционной промышленной роботизацией производства.
2. Интенсивная разработка роботов для медицинских и биотехнологических применений.
3. Появление принципиально новой области медицинской робототехники и мехатроники, которая направлена на встраивание интеллектуальных киберфизических устройств в живые органы животных и человека.
4. Создание интеллектуальных роботов на базе методов искусственного интеллекта, интеллектуальных программных и аппаратных мехатронных решений.
5. Становление новой научной и образовательной дисциплины — роботэтики, предметом исследований которой является проблема коллаборации людей и интеллектуальных роботов.