



приоритет2030⁺

Научный редактор

И.А. Иванов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ В ОБЛАСТИ
ИМПЛАНТИРУЕМОЙ И НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
И МОДИФИКАЦИЙ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА

4 том доклада

«Глобальный ландшафт исследований и перспективных разработок в области укрепления человека»

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ТРЕНДЫ В ОБЛАСТИ
ИМПЛАНТИРУЕМОЙ
И НОСИМОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ
И МОДИФИКАЦИЙ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ЧЕЛОВЕКА**

**Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)**

Стратегический проект «Успех и самостоятельность
человека в меняющемся мире»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ В ОБЛАСТИ ИМПЛАНТИРУЕМОЙ И НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И МОДИФИКАЦИЙ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА

4 том доклада

«Глобальный ландшафт исследований и перспективных разработок
в области укрепления человека»

**Научный редактор
И.А. Иванов**



приоритет2030[^]

Электронное издательство «Эгитас»
Москва, 2022

УДК 1331.56, 57.08
ББК 28.7, 87.52
И20

Научный редактор

Иванов Илья Александрович, доцент Департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова НИУ ВШЭ.

Авторский коллектив

Иванов Илья Александрович, доцент Департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова НИУ ВШЭ (введение, заключение);

Кислицын Дмитрий Викторович, доцент, НИУ ВШЭ в Санкт-Петербург, Санкт-Петербургская школа экономики и менеджмента / Департамент экономики (глава 4, глава 5);

Мартынова Ольга Владимировна, старший научный сотрудник, институт когнитивных нейронаук, центр нейроэкономики и когнитивных исследований НИУ ВШЭ (глава 1, глава 2, глава 3);

Альшанская Евгения Игоревна, аспирант, факультет социальных наук, департамент психологии (глава 1, глава 2, глава 3).

Рецензент

Лышов Сергей Максимович, доцент Кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, РТУ МИРЭА, кандидат технических наук.

ISBN 978-0-3694-0896-9 (серия)
ISBN 978-0-3694-0900-3 (том)

© Национальный
исследовательский университет
«Высшая школа экономики»,
Институт образования, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Перечень сокращений и обозначений..... | 6 |
| Введение | 7 |
| 1. Анализ «зрелых» технологий сенсоров в области имплантируемой и носимой электроники | 17 |
| 1.1 Глобальная система позиционирования (gps) и барометры | 29 |
| 1.2. Движение/активность/шаги | 30 |
| 1.3. Сердечный ритм, частота и вариабельность | 33 |
| 1.4. Фотоплетизмография | 37 |
| 1.5. Стресс | 38 |
| 1.6. Биоимпеданс | 39 |
| 1.7. Сон/восстановление | 40 |
| 2. Анализ новых технологий в области имплантируемой носимой электроники..... | 43 |
| 2.1. Неинвазивное измерение глюкозы | 43 |
| 2.2. Данные среды | 45 |
| 2.3. Гидратация | 46 |
| 2.4. Уровень холестерина | 46 |
| 2.5. Давление | 47 |
| 2.6. Умная одежда с датчиками | 51 |
| 2.7. Covid-19 и восстановление | 51 |
| 2.8. Другие разнообразные решения в области новых датчиков для укрепления здоровья | 52 |

| | |
|---|------------|
| 3. Анализ фронтир-технологий в области имплантируемой и носимой электроники..... | 54 |
| 3.1. Биохимические датчики | 55 |
| 3.2. Эпидермальная электроника | 55 |
| 3.3. Измерение внутриглазного давления | 58 |
| 3.4. Генетика и носимые устройства | 59 |
| 3.5. Трекеры пота | 60 |
| 3.6. Анализ крови и сенсоры..... | 61 |
| 3.7. Измерение уровня кортизола | 64 |
| 4. Мировой рынок носимой электроники: тенденции и ключевые игроки..... | 67 |
| 5. Носимая электроника для укрепления здоровья: анализ применимости и эффективность технологий | 86 |
| Заключение | 100 |
| Список использованной литературы | 106 |

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АД — артериальное давление

ВГД — внутриглазное давление

ВОЗ — всемирная организация здравоохранения

ВСР — variability сердечного ритма

ДАД — диастолическое артериальное давление

ИМ — инфаркт миокарда

МО — машинное обучение

МЭМС — микроэлектромеханические системы (MEMS, Microelectromechanical Systems)

ППР — поверхностный плазмонный резонанс

САД — систолическое артериальное давление

СОАС — синдром обструктивного апноэ сна

ССЗ — сердечно-сосудистые заболевания

ФПГ — фотоплетизмография

ЧСС — частота сердечных сокращений

ЭКГ — электрокардиограмма

ЭМГ — электромиограмма

ЭЭГ — электроэнцефалограмма

ВИА — (Bioelectrical Impedance Analysis) анализ биоэлектрического импеданса

CRISPR — (Clustered Regularly Interspaced short palindromic repeats) технология направленного редактирования генома

GET — (Graphene Electronic Tattoos) графеновые электронные татуировки

GPS — (Global Positioning System) система глобального позиционирования

IMU — (Inertial Measurement Unit) инерциальный измерительный блок

IoT — (Internet of Things) интернет вещей

ВВЕДЕНИЕ

Здоровье всегда являлось весомым капиталом человека, а грамотное распоряжением им всегда приносило ощутимые инвестиции. В современном мире с его темпами, задачами и вызовами у большинства людей все меньше времени остается на сохранение, поддержание и тем более укрепление здоровья. Но на возникающий запрос, формируется решение, продиктованное самим обществом, а именно, его цифровым отражением. Оцифровка общественной и личной жизни, несмотря на ее множественные недостатки, предоставляет огромные возможности, в том числе в отношении здоровья. Понятие цифровое здравоохранение включает в себя инструменты и технологии, повышающие эффективность оказания медицинской помощи, ее доступность и прозрачность. По данным всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [1], цифровые технологии теперь являются неотъемлемой частью повседневной жизни людей, инновации, особенно в цифровой сфере, происходят в беспрецедентных масштабах. Тем не менее, их применение для улучшения здоровья населения остается в значительной степени неиспользованным. В связи с этим перед ВОЗ стоят следующие основные задачи по содействию внедрению и расширению цифрового здравоохранения и инноваций:

1. Развитие и продвижение стандартов функциональной совместимости и обмена данными между цифровыми устройствами и платформами для получение комплексной картины как об обществе в целом, так и персонально о конкретном человека. При этом стоит отметить и важную проблему обеспечения безопасности распространения персональных данных

2. Обеспечение эффективного взаимодействия научного и медицинского сообществ для получения новых знаний, имеющих клиническое значение, и формирования подходов к лечению, не ограничиваясь необходимостью фактических встреч, или опубликования научных трудов в журналах.
3. Систематическая оценка потребностей общества в предложенных инновациях.

Глобальная стратегия ВОЗ [2] в области цифрового здравоохранения, принятая Всемирной ассамблеей здравоохранения в 2020 г., представляет собой дорожную карту, позволяющую связать последние разработки в области инноваций и цифрового здравоохранения и использовать эти инструменты для улучшения показателей здоровья.

Стратегическое видение ВОЗ заключается в том, чтобы цифровое здравоохранение способствовало справедливому и всеобщему доступу к качественным медицинским услугам. Цифровое здравоохранение может помочь сделать системы здравоохранения более эффективными и устойчивыми, позволяя им оказывать качественную, доступную и справедливую помощь.

ВОЗ использует возможности цифровых технологий и инноваций в области здравоохранения для ускорения глобального достижения здоровья и благополучия.

При этом стоит отметить, что цифровое здравоохранение включает в себя не только и не столько цифровые платформы, информацию на которых передают медицинские учреждения и используемые в них медицинские приборы.

Современный человек полностью погружен в цифровой мир, нас окружает множество систем, которые могут быть полезны при оценке персонального здоровья. Причем существенное влияние на это оказала пандемия вирусной инфекции COVID-19. Которая заставили многих людей более внимательно относиться к собственному здоровью.

Тематика здравоохранения интересует не только медицинские и научные организации и отдельных людей, серьезный интерес данная тематика вызывает и у мультимиллиардных корпораций, которые вкладываются в развитие технологий мониторинга состояния человека, оценки его показателей здоровья и физиологического состояния.

В условиях активного развития информационных технологий ключевым направлением цифровизации здравоохранения конечно же являются платформенные решения, базы данных алгоритма обработки больших данных. Это быстрорастущий рынок. Precedence Research [3] прогнозирует, что совокупный годовой темп роста мирового рынка цифрового здравоохранения составит 27,9% в период с 2020 по 2027 годы, когда он достигнет 833,44 млрд долларов. По данным исследовательской фирмы из Оттавы, этому росту способствует скачок количества медицинских приложений и сервисов. На Северную Америку приходится доминирующая доля на мировом рынке цифрового здравоохранения из-за роста пожилого населения в регионе, высокой скорости внедрения смартфонов и стремления разрабатывать приложения и платформы цифрового здравоохранения для снижения затрат на здравоохранение.

Но эффективное развитие цифрового здравоохранения невозможно без данных о здоровье. Еще недавно основным источником подобной информации могли являть медицинские приборы, установленные в больницах и поликлиниках. Но с развитием аппаратных технологий и появлением новых алгоритмов возможно обеспечить непрерывный поток

данных о ключевых показателях здоровья. В первую очередь это возможно благодаря применению так называемых носимых технологий. Термин «носимые» используется для устройств, которые измеряют данные пользователя в режиме реального времени с помощью датчиков (приемников), размещенных или имплантированных в тело человека или элементы одежды, а затем отправляют их на цифровую платформу для анализа и принятия решений. Термин «носимый» часто используется в сочетании с такими терминами, как технология и устройства (электроника). Достижения в области носимой электроники и искусственного интеллекта помогают миллионам людей как выявлять и лечить заболевания, так и следить за поддержанием здоровья благодаря применению миниатюрных устройств, размещенных на запястье, в одежде или прикрепленных к любой части тела с помощью пластыря. По прогнозам Deloitte Global [4], в 2022 году по всему миру будет продано 320 миллионов потребительских носимых устройств для здоровья и хорошего самочувствия. К 2024 году эта цифра, вероятно, достигнет почти 440 миллионов единиц, поскольку на рынке появляются новые предложения и все больше поставщиков медицинских услуг начинают их использовать. Эти цифры включают в себя как смарт-часы, которые продаются и покупаются потребителями, так и носимые медицинские устройства, обычно называемые «умными пластырями», которые часто назначаются медицинскими работниками, но все чаще становятся доступными в готовом виде.

Любое устройство класса носимой электроники содержит в своей основе чувствительные элементы (сенсоры, датчики), работа которых основана на различных физических принципах, определяющих набор измеряемых параметров. Таким образом, в зависимости от типа датчика возможно измерение следующих параметров: количество шагов, скорость, положение в пространстве, сила удара, давление окружающей среды, артериальное давление, ЧСС, насыщение крови кислородом, параметры

сна и многое другое. И это всего лишь стандартный набор параметров, присутствующий в достаточно большом количестве носимых устройств.

Благодаря новым научным достижениям появилось множество новых типов сенсоров, а значит, и устройств. Несмотря на то, что любые носимые технологии могут отслеживать фоновые показатели, связанные со здоровьем, есть разница между устройствами для поддержания здоровья и здорового образа жизни и медицинскими устройствами. В ряде стран сейчас разрабатываются стандарты отделения одного типа устройств от других.

В основе любого изделия лежат схожие типы сенсоров и технологий. На настоящий момент можно выделить несколько основных направлений развития устройств. Первое — самостоятельное использование оборудования и использование оборудования для медицинских целей. И второе — использование новых сенсорных систем для сверхточной и предиктивной диагностики. Последние могут использоваться в лабораторных и медицинских условиях для высокоточной и быстрой диагностики, а также на основе данных, собранных этими методами, и с помощью алгоритмов искусственного интеллекта помогать врачам принимать решения.

Различия заключаются в том, что первые собирают, анализируют и предоставляют общую информацию о здоровье, но не учитывают патологии и изменения, то есть не могут давать медицинских рекомендаций и делать прогнозы.

Второй тип устройств использует собранную информацию, анализирует, систематизирует и представляет ее медицинским сотрудникам для принятия решений и ведения пациентов, а также для снижения рисков потери пациентов в неподконтрольное медицинскому персоналу время. Например, инсульты и удары могут случиться и во время сна. Таким образом, носимые устройства могут спасти жизни, наблюдая за пациентами в любое время.

Третье направление — стационарные сенсорные системы: лаборатории высокой точности, позволяющие более быстро и качественно делать анализы, принятые в клинической практике.

Четвертое направление — малоинвазивные сенсоры, которые только начинают использоваться в практике отслеживания уровня глюкозы.

Пятое направление — инвазивные сенсоры, которые используются в случаях, когда невозможна высокоточная диагностика. Это направление с максимальным использованием потенциала, в том числе доставка лекарств к целевым органам и клеткам. Ограничение этого метода заключается в том, что инвазивные сенсоры подразумевают повышенные риски инфицирования. Транскраниальные технологии (основанные на применении магнитного поля и/или электрических импульсов) используются только в крайних случаях, так как подвергают опасности мобильность и независимость пациента.

В представленном томе технологические направления сгруппированы в три раздела:

1. «Зрелые» технологии сенсоров в области имплантируемой и носимой электроники. Рассмотренным технологиям характерны: высокая точность диагностики требуемых показателей, апробированные алгоритмы, база проведенных клинических и полевых исследований. К ним относятся датчики пульса, вариабельности сердечного ритма, частоты сердечных сокращений, пульсоксиметрия, электропроводимость кожи, акселерометры, GPS (для анализа показателей движения), термометры, биоимпеданс, шум, ЭКГ (частичная точность), дыхания и др.
2. Новые технологии в области имплантируемой и носимой электроники. Рассмотренным технологиям характерны: точность диагности-

ки требуемых показателей в процессе уточнения, клинические исследования в процессе, полевые исследования только запущены. К ним относятся носимые, неинвазивные или малоинвазивные датчики уровня инсулина и глюкозы, давления и гидратации. На настоящий момент неинвазивные и малоинвазивные датчики уровня глюкозы — основное направление развития в данной категории.

3. Фронтир-технологии в области имплантируемой и носимой электроники: описаны возможности технологии, созданы предварительные модели девайсов, исследования не проводились. К ним относятся неинвазивные методы и алгоритмы анализа нейромедиаторов и гормонов (включая кортизол), а также разработки датчиков на инновационных материалах.

Эффективность разрабатываемых и применяемых технологий определяется не только их точностью и достоверностью, но и удовлетворенностью общества от их применения. В данном томе также будут сформулированы возможные критерии эффективности носимой электроники для укрепления здоровья. Предварительно можно выделить следующие критерии:

1. Улучшение объективных показателей физического здоровья (индекс массы тела, кровяное давление т. п.) у использующих устройства носимой электроники по сравнению с теми, кто их не использует.
2. Более высокий уровень удовлетворенности жизнью и психологического благополучия у использующих устройства носимой электроники по сравнению с теми, кто их не использует.
3. Увеличение времени занятия физической культурой и спортом у использующих устройства носимой электроники по сравнению с теми, кто их не использует.

Описанные критерии могут конфликтовать между собой. Так, социальный компонент использования устройств, а именно тот факт, что пользователи активно делятся показателями друг с другом и сравнивают себя с другими, может быть эффективен с точки зрения стимулирования к занятиям физической активности и спорта, но порождать ощущение неудовлетворенности и тревожности.

Использование носимой электроники в специализированных медицинских целях должно оцениваться с точки зрения критериев доступности медицинских услуг. Наиболее признанной моделью оценки доступности медицинских услуг является подход Availability, Accessibility, Acceptability, Quality (AAAQ). Увеличение Availability означает увеличение производства медицинских услуг, которое достигается с помощью внедрения новых технологий носимой электроники. Accessibility означает, что новые технологии позволяют как снизить цену медицинских услуг, так и сократить денежные издержки доступа (например, необходимость регулярно ездить в больницу). Acceptability означает увеличение приемлемости использования медуслуг со стороны маргинализированных групп и групп с культурными отличиями. Наконец, Quality означает, что медицинские услуги, оказываемые при помощи устройств носимой электроники, будут не ниже качеством, чем аналогичные услуги, оказываемые без их помощи. Описанные критерии использованы для оценки применимости и эффективности использования устройств носимой электроники в специализированных медицинских целях.

Несомненно, важным аспектом внедрения и развития технологий является готовность рынка и ключевые тенденции в области носимой электроники, динамика спроса и предложения.

Среди ключевых игроков на рынке выделены: Xiaomi Global Community, Huawei Technologies, Nike, Motorola Solutions, Sony Corporation, Google, HTC

Corporation, Michael Kors, ADIDAS AG, Polar Electro, TomTom International BV, Fossil Group, ASUSTeK Computer, SAMSUNG, Apple, LG Electronics, CASIO AMERICA, INC., Garmin Ltd., Withings, Fitbit.

Рынок носимой электроники для подробного анализа сегментирован по следующим основаниям:

1. Тип устройства:

- a) умные часы;
- b) фитнес-браслеты;
- c) умные наушники;
- d) умные очки;
- e) умная одежда;
- f) другое.

2. Применение:

- a) фитнес и спорт;
- b) здравоохранение;
- c) развлечения;
- d) бытовые приложения;
- e) безопасность и военные приложения;
- f) коммерческие приложения.

3. Регион (страны упоминаются по порядку размера рынка):

- a) Северная Америка (США, Канада, Мексика);
- b) Европа (Великобритания, Германия, Франция, Италия, Испания, другие страны Европы);
- c) Азиатско-Тихоокеанский регион (Китай, Япония, Индия, страны АСЕАН, Австралия, другие страны АТР);

- d) Латинская Америка, Ближний Восток и Африка (Бразилия, Южная Африка, Саудовская Аравия, Турция, другие страны).

Отдельно рассмотрена динамика различных сегментов рынка носимой электроники.

1. АНАЛИЗ «ЗРЕЛЫХ» ТЕХНОЛОГИЙ СЕНСОРОВ В ОБЛАСТИ ИМПЛАНТИРУЕМОЙ И НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Носимые устройства — это общий термин для описания электронных сенсорных систем, таких как умные часы, кольца, очки, аксессуары, датчики, встроенные в обувь и одежду и даже татуированные на коже или имплантированные в тело пользователя. Функциональные мини-компьютеры, имеют аккумуляторы, батареи и контроллеры, микропроцессоры, память и возможность подключения к Интернету (рисунок 1). Наиболее полный обзор оптимальных технологий представлен в этой статье Nature Reviews [5].

СЕНСОРЫ

Биораспознающие элементы

- Энзимы
- Родственные белки
- Пептиды
- Аптамеры
- CRISPR

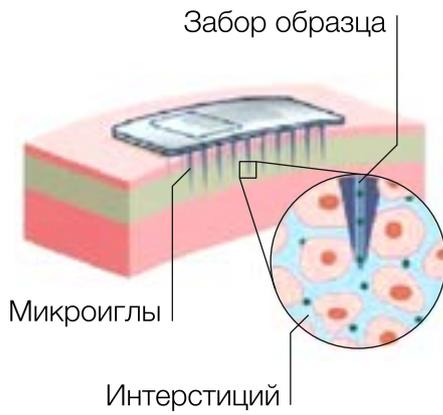
Преобразование сигнала

- Электромеханическое
- Электрическое
- Оптическое
- Электрохимическое

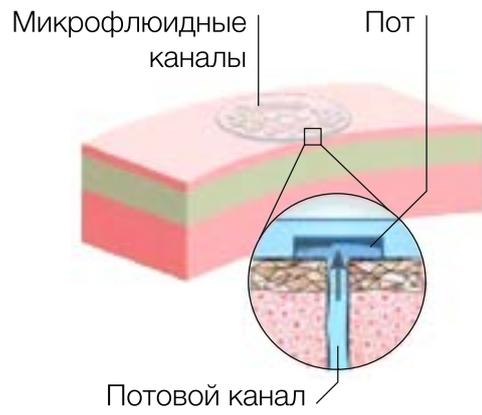
Усиление сигнала

- Химическое
- Электрическое
- Цифровое

ЖИДКОСТЬ В КОЖЕ



ПОТ



ДЫХАНИЕ



СЛЕЗА



МОЧА



СЛЮНА



МАТЕРИАЛЫ

Субстраты

- Натуральные материалы
- Синтетические полимеры
- Гидрогели
- Неорганические материалы

Электроды

- Металлы
- Углеродные материалы
- Гидрогели

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Преобразование
- Обработка
- Передача
- Хранение

БЛОКИ ЭНЕРГИИ

- Получение
- Хранение

Рисунок 1. Структурные блоки носимых устройств. Адаптировано из [5]

Носимым технологиям почти 30 лет (рисунок 2), и, согласно отчетам CCS Insight, в потребительском секторе продажи смарт-браслетов (также известных как трекеры активности от таких компаний, как Jawbone и Fitbit) начали расти в 2013 году, достигнув 193 миллионов единиц в 2020 году [6].



Рисунок 2. Этапы создания носимых сенсоров. Адаптировано [5]

Ниже на рисунке 3 представлен опрос за 2021 год по наиболее используемым носимым технологиям от компании Делойт.

Прогнозируется и дальнейший рост популярности устройств, и рост рынка за счет усовершенствования и развития технологии, в том числе новых подходов к сенсорам, алгоритмам и инфраструктурным решениям для цифрового здоровья, цифровой медицины, предиктивных и профилактических мер [8].

Например, согласно отчету PriceWaterhouseCoopers о будущем носимых устройств за 2020 год, по крайней мере каждый четвертый американец использует носимое устройство [9].

Также прогнозируется рост медицинского использования носимых устройств согласно ответу Boston Consulting Group [7] и The Future of Digital Health [7].

Носимые устройства чаще всего используют для мониторинга здоровья сердца: качества сна и контроля хронических заболеваний.

Респонденты отвечали на вопрос «для чего вы используете носимые устройства».



Ответившие на этот вопрос лично владели фитнес-трекером или смарт-часами и пользовались этими устройствами. Данные демонстрируют ответы потребителей США в июне 2021 года. Источник: исследование компании "Делойт" за 2021 г. в области возможностей использования и мобильных технологий.

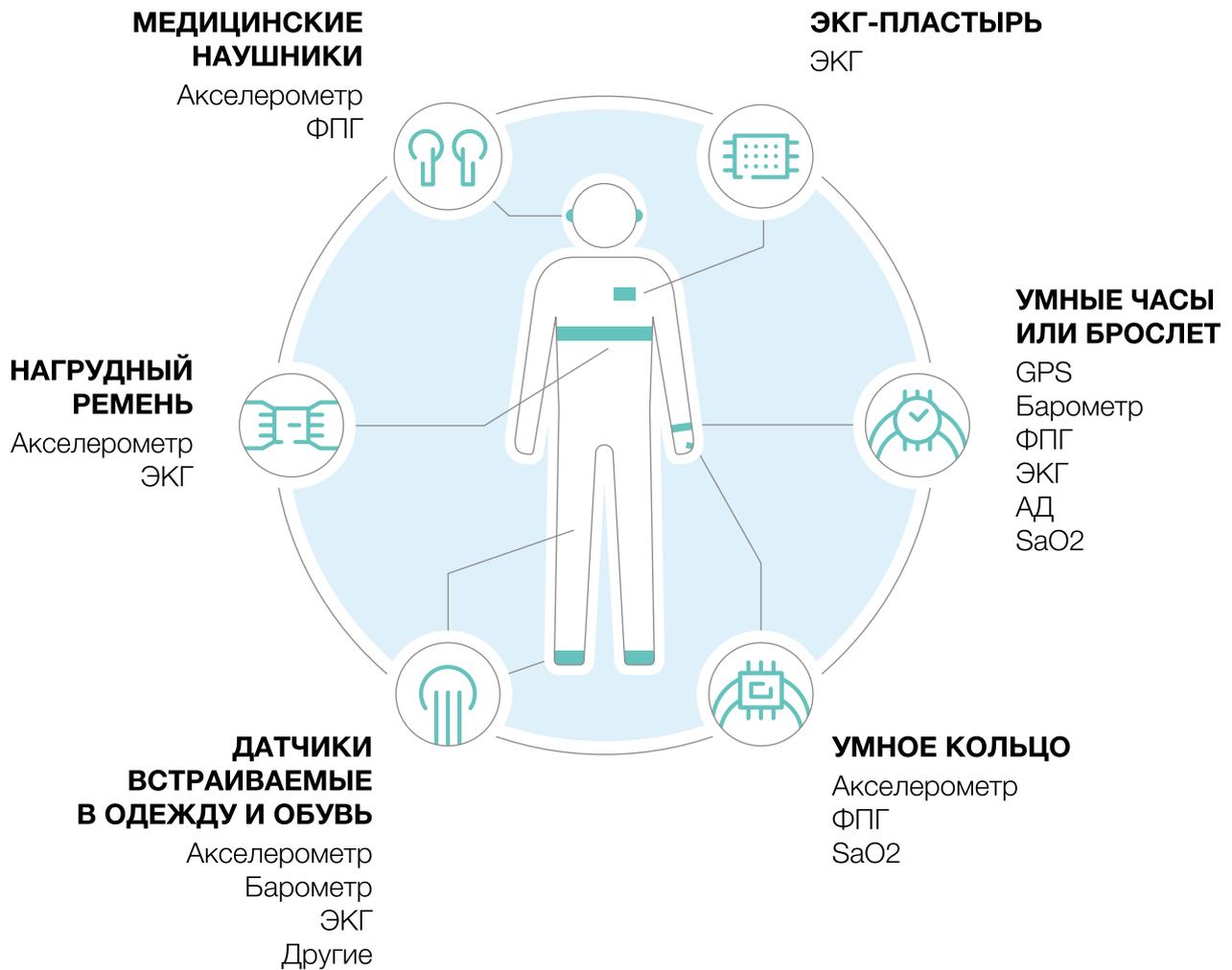
Рисунок 3. Используемые функции носимых устройств. Адаптировано из [7]

В 2020 году рынок достиг почти 24 миллиардов долларов, показав рост в 22%. Это связано с эпидемией COVID-19 и необходимостью пристально следить за показателями здоровья.

Ускоренный рост связан с широким распространением смартфонов на мировых рынках, низкой стоимостью микроэлектромеханических систем датчиков (МЭМС), энергоэффективными технологиями подключения (Bluetooth 4.0) и развитой экосистемой приложений, а также с развитием систем больших данных и машинного обучения, позволяющих быстро анализировать данные и строить алгоритмические прогнозы (лидер компании Fitbest, приобретенной гигантом Garmin).

В первую очередь носимые устройства ориентированы на основные показатели жизнедеятельности, такие как: биометрические данные (вводятся пользователем), движение, частота сердечных сокращений, режим сна, уровень кислорода в крови, данные об окружающей среде, такие как воздействие УФ-излучения и CO₂, что позволяет владельцу немедленно получать обратную связь и возможность реагировать.

Носимые технологии включают акселерометры, шагомеры, барометры и GPS, используемые для измерения расхода энергии и моделей движения (рисунок 4).



| Сенсоры | Измерения | Клиническое применение |
|-------------------|---|---|
| Активность | | |
| Акселерометр | Подсчет шагов, ударная нагрузка, скорость, время в сидячем положении, физические упражнения | <ul style="list-style-type: none"> • Оценка риска для здоровых людей и тех, у кого есть установленные ССЗ • Роль в физической активности в первичной и вторичной профилактике • Кардиологическая телереабилитация • Терапия сердечной недостаточности |
| Барометр | Набор высоты | |
| GPS | Пройденная дистанция | |
| | Количество сожженных калорий, вычисленное с помощью множества вычислений | |
| Биометрия | | |

| Сенсоры | Измерения | Клиническое применение | |
|---|---|---|--|
| ФПГ | ЧСС, ВСР, ВИСР, безманжеточное АД, | <ul style="list-style-type: none"> • Прогнозирование риска для здоровых людей и тех, у кого есть установленные ССЗ • Обследование и диагностирование гипертензии, аритмии • Кардиологическая телереабилитация • Острого коронарного дисбаланса (например, гиперкалиемии) • Долгосрочная диагностика интервала «QT» • Терапия сердечной недостаточности • Титрование препаратов (например, бета-блокаторов) | |
| | SaO ₂ , сердечный выброс, ударный объем, определение ритма по пульсу, сон и его стадии | | |
| ЭКГ | Моно- и многоканальная ЭКГ, непрерывный ЭКГ мониторинг по необходимости, интервальные измерения: интервала QT, выявление аритмии, изменений в электролитном балансе | | |
| Другие | | | |
| Биохимические сенсоры | <ul style="list-style-type: none"> • Инвазивные для непрерывного мониторинга концентрации глюкозы и электролитов в плазме крови. • Неинвазивные для определения содержания электролитов в слюне и поте, а также волемический статус | <ul style="list-style-type: none"> • Идентификация электролитных нарушений • Продолжительный мониторинг гликемии • Терапия сердечной недостаточности | |
| Биомеханические сенсоры, такие как: - баллистокордиограф - сейсокардиограф и - лиэлектрические сенсоры | Сердечный выброс, ударный объем, жизненная емкость легких, колебания тела, вес | | |

Рисунок 4. Сводные данные по типам зрелых сенсоров. Адаптировано [10]

Носимые устройства, основанные на датчиках для измерения маневров тела, предлагают потребителям данные о себе. Благодаря развитию технологии датчиков носимые устройства теперь обладают более глубокими измерительными возможностями. Следовательно, потребители больше узнают о себе и могут впоследствии изменить свой образ жизни.

АКСЕЛЕРОМЕТРЫ

Это датчики, используемые в носимых устройствах. Их тип ускорения — такие как гравитационный и линейный — демонстрирует их сенсорные способности. Между тем их измерительная способность позволяет программировать измеренные данные для различных целей. Например, бегущий пользователь может получить доступ к своей максимальной скорости наряду с ускорением. Кроме того, акселерометры могут отслеживать характер сна.

ГИРОСКОПЫ

Такой тип устройств [11] также является распространенным носимым датчиком. Они отличаются от акселерометров тем, что регистрируют только угловые ускорения. В некоторых реализациях акселерометр используется для измерения вращательного ускорения, в то время как некоторые системы хотели бы использовать и то, и другое для фильтрации ошибок. Гироскопы повышают точность отслеживаемых данных, и среди технологических решений доступны многочисленные типы, в том числе газовые, механические и оптические.

Магнитометры [12] могут быть интегрированы для создания инерциального измерительного блока (IMU) с акселерометрами и гироскопами. Все эти датчики могут иметь три оси каждый, очень похожи на компас и могут улучшить баланс. В то время как с ними обычно используются гироскопы и акселерометры, магнитометры соответствуют им, фильтруя ориентацию движения.

ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

GPS [13] — это распространенный датчик, используемый на многих устройствах, таких как смартфоны и смарт-часы. Он используется для сканирования и информирования пользователей об их местоположении. Информация отправляется на спутник для количественного определения точного местоположения и времени. Он служит передатчиком и приемником, в котором информация возвращается к датчику для уведомления о местоположении.

ШАГОМЕРЫ

Обычно находятся в носимых устройствах, ориентированных на физическое здоровье, и могут подсчитывать шаги пользователя во время бега или ходьбы. Есть два варианта шагомеров: электрические и механические. Первая форма сегодня наиболее популярна и зависит от технологии МЭМС (датчиков на основе микроэлектромеханических систем MEMS) для эффективности, но по-прежнему работает на принципах, основанных на механическом шагомере.

ДАТЧИКИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Чаще всего [14] работают от тензодатчиков. Когда к датчикам прикладывается давление, цепь вызывает изменение сопротивления. Механические величины, такие как сила, наблюдаются разными способами и преобразуются в электронные измерения, зависящие от сопротивления. Этот метод измерения давления достигается за счет конструкции моста Уитстона, который может отслеживать изменения статического или динамического сопротивления. Сенсорное устройство будет состоять из одного, двух или четырех плеч в конфигурации моста Уитстона. Количество зависит от использования устройства (сколько на растяжение и на сжатие).

Сенсорный механизм позволяет интегрировать их во внешние факторы, такие как оборудование для контроля контакта с мячом.

ИНТЕГРАЦИЯ ДАТЧИКОВ В НОСИМЫЕ УСТРОЙСТВА

Микроконтроллер является ключевым компонентом, обеспечивающим работу носимых устройств [15]. Это обычно рассматривается как небольшой компьютер (чиповая система), который позволяет интегрировать интернет вещей (IoT) с желаемым приложением. Что наиболее важно, это исключает использование множества электронных компонентов для выполнения различных функций на одном чипе. Из-за простоты программирования, перепрограммирования, стоимости, размера, возможности подключения к другим датчикам и способности выполнять сложные функции, включая графические дисплеи, его лучше всего использовать в носимых технологиях. Универсальность позволяет настраивать микроконтроллеры в соответствии с требованиями заказчика.

ДАТЧИКИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Для измерения частоты сердечных сокращений доступны различные методы и датчики. Один метод использует емкостное зондирование, чтобы идеализировать электрод (датчик) и кожу как две части обычного конденсатора. Фотоплетизмография — это метод, использующий свет для отслеживания изменений объема кровотока. Фитнес-трекеры, такие как Fitbit, полагаются на этот подход с использованием фотодиода. На кожу владельца непрерывно передается зеленый свет, который измеряет поглощение света фотодиодом. Эта информация передается для расчета пульса. Чем больше крови проходит через кровоток пользователя, тем больше света поглощают диоды.

МИКРОФОНЫ И АНАЛИЗ УРОВНЯ ШУМА, ГОЛОСОВОЙ ВВОД

На сегодняшний день существует множество приложений распознавания голоса. Для детей и пожилых людей это самый удобный способ запрашивать и получать нужную информацию.

По такому принципу работают умные колонки. Функция распознавания голоса очень важна и для носимых устройств. Для пожилых людей, которые не всегда могут рассмотреть экран, — это лучшее решение.

Есть решения, базирующиеся на МЭМС-технологиях. И их применение рекомендовано для использования людьми с ограниченными возможностями [16]. Ограничение этих датчиков — точность распознавания голоса и отделение главного сигнала от шума.

Для решения этой проблемы группа ученых разработала гибкий и носимый датчик голоса, который точно распознает голос пользователя, не реагируя на окружающие голоса. Распознавание вибрации кожи в области шеи [17].

Можно предположить, что постоянное ношение датчиков на шее не всегда оптимально, в то время как алгоритмы распознавания голоса будут развиваться дальше и позволят добиваться оптимальной чистоты и скорости передачи и получения информации.

ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ

Оптические датчики играют все более важную роль в разработке медицинских диагностических устройств. Их можно очень широко использовать для измерения физиологии человеческого тела. Оптические методы включают фотоплетизмограмму, радиационные, биохимические и оптоволоконные датчики. Оптические датчики обладают превосходными метрологическими свойствами, невосприимчивостью к электромагнитным

помехам, электробезопасностью, простотой миниатюризации, возможностью захвата нанометровых объемов и неинвазивным исследованием. Кроме того, они дешевы и устойчивы к воде и коррозии. Использование оптических датчиков может принести более совершенные методы непрерывной диагностики в домашних условиях и развитие телемедицины в XXI веке по данным статьи «The Current State of Optical Sensors in Medical Wearables» [18].

Флагманские устройства, предназначенные для спортсменов, которым требуется сбор биометрических данных олимпийского уровня для профессиональных программ тренировок. Данные включают в себя такие показатели, как VO_2 max и статус тренировки с поправками на жару, статус акклиматизации к высоте, фокус тренировочной нагрузки, время восстановления, а также аэробные и анаэробные эффекты тренировки.

1.1 ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ (GPS) И БАРОМЕТРЫ

GPS и барометры в обязательном порядке включены в носимые устройства для более точной оценки физической активности. Основанная на многовековых достижениях в области физики, GPS использует систему из 24 или более спутников, которые непрерывно излучают сигналы для определения их точного орбитального положения и времени на основе чрезвычайно точных и стабильных атомных часов. С помощью сложных уравнений, включающих время излучения сигнала и скорость света и учитывающих релятивистские концепции Эйнштейна, приемник GPS может определить свое расстояние, по крайней мере, от четырех спутников. Затем приемник может триангулировать свое положение на земле с точностью до 4,9 м. Однако функция GPS ограничена геометрией спутника, блокировкой сигнала, отражениями от зданий, атмосферными условиями и особенностями конструкции самого приемника. Напротив, в барометрах используется диафрагма,

установленная на вакуумной камере, которая сжимается пропорционально давлению. Величина деформации диафрагмы преобразуется в электрические сигналы с помощью емкостной модели, основанной либо на сближении пластин, либо на модели пьезорезистивной деформации, в которой резисторы на диафрагме изменяют свое электрическое сопротивление в зависимости от степени деформации [19]. Затем барометр может определять изменения высоты, отслеживать количество ступеней и обнаруживать падения на основе принципа, согласно которому атмосферное давление уменьшается с увеличением высоты. Однако барометрические измерения могут быть подвержены ошибкам, поскольку устройство может принять естественные изменения температуры и давления окружающей среды за изменение высоты над уровнем моря. Использование большего количества датчиков приводит не только к лучшей оценке физической активности и расхода энергии, но и позволяет увеличить срок службы батареи.

1.2. ДВИЖЕНИЕ/АКТИВНОСТЬ/ШАГИ

Измерение движения на настоящий момент — одна из самых зрелых и наиболее часто используемых технологий [20, 21]. Применяется во всех типах носимых устройств, за исключением обручей для неинвазивной ЭКГ.

Акселерометрия: принципы и датчики

Инерционные датчики в основном представляют собой сенсоры силы для измерения линейного ускорения в одном или нескольких направлениях или углового движения вокруг одной или нескольких осей. Первый называется акселерометром, второй — гироскопом. Общий принцип работы акселерометров основан на механическом чувствительном элементе, который состоит из контрольной массы (или сейсмической массы), прикрепленной к системе механической подвески относительно системы отсчета. Сила инерции из-за ускорения или силы тяжести заставляет пробную массу отклониться в соответствии со вторым законом Ньютона. Ускоре-

ние можно измерить электрически по физическим изменениям смещения пробной массы относительно системы отсчета. Пьезорезистивные, пьезоэлектрические и дифференциально-емкостные акселерометры являются наиболее распространенными типами датчиков для измерения движений.

1.2.1. ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ

Чувствительный элемент пьезорезистивного акселерометра состоит из консольной балки, а его контрольная масса сформирована объемной микрообработкой. Движение контрольной массы из-за ускорения можно обнаружить с помощью пьезорезисторов в консольной балке и контрольной массе. Пьезорезисторы расположены по схеме моста Уитстона для создания напряжения пропорционально приложенному ускорению. Пьезорезистивные акселерометры просты и недороги. Производятся массово с середины XX века. Пьезорезистивные акселерометры чувствительны к постоянному току и могут измерять постоянное ускорение, такое как сила тяжести, что позволяет учитывать особенности движения, ударов, вибрации с высокой точностью. Основными недостатками пьезорезистивных датчиков являются термочувствительный дрейф и более низкий уровень выходных сигналов.

1.2.2. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ

В пьезоэлектрическом акселерометре чувствительный элемент изгибается из-за приложенного ускорения, которое вызывает смещение сейсмической массы и приводит к выходному напряжению, пропорциональному приложенному ускорению. Пьезоэлектрические акселерометры не реагируют на постоянную составляющую ускорений, что позволяет учитывать разные типы движений и анализировать их. Например, это важно при диагностике моторных расстройств.

1.2.3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЕМКОСТНЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ

Смещение контрольной массы можно измерить емкостным способом. В емкостном сенсорном механизме сейсмическая масса заключена между двумя электродами. Дифференциальная емкость пропорциональна отклонению сейсмической массы между двумя электродами. Преимуществами дифференциальных емкостных акселерометров являются низкое энергопотребление, большой выходной уровень и быстрая реакция на движения. Лучшая чувствительность также достигается за счет низкого уровня шума емкостного обнаружения. Дифференциальные емкостные акселерометры также имеют характеристику постоянного тока. В настоящее время этот вид акселерометров широко используется в большинстве приложений, особенно в мобильных и портативных системах и бытовой электронике. Например, применение таких датчиков в телефонах позволяет считать количество шагов и разные типы движений и вносить их в соответствующие приложения активности.

1.2.4. РАЗМЕЩЕНИЕ ДАТЧИКА

Местоположение сенсоров очень важно при анализе движения. Нательные датчики активности можно размещать на разных частях тела человека, движения которых изучаются. Во многих случаях необходимо измерить показатели движения всего туловища. Поэтому датчики обычно размещают на груди, пояснице и талии. В большинстве исследований принято размещать датчики движения на талии из-за того, что талия находится близко к центру масс всего тела, а туловище занимает наибольшую массу человеческого тела. Это означает, что ускорения, измеренные одним датчиком в этом месте, могут лучше отражать основное движение человека. С эргономической точки зрения туловище может лучше выдерживать дополнительный вес при ношении носимых устройств. Датчики или устройства можно легко прикрепить или отсоединить от пояса на уровне

тали. Следовательно, размещение на талии вызывает меньше ограничений в движениях и дискомфорт также может быть сведен к минимуму. Ряд основных повседневных действий, включая ходьбу, позы и переходы между видами деятельности, можно классифицировать в соответствии с ускорением, измеренным с помощью носимого на поясе акселерометра. Был также представлен подход с использованием нагрудного акселерометра для выявления особенностей дыхания и храпа для диагностики апноэ во время сна [22].

Акселерометры могут крепиться к запястьям, бедрам или лодыжкам. Продолжительность сна можно определить с помощью анализа движений с данных носимого на запястье акселерометра, именно так и измеряется уровень активности во время сна. Акселерометры, прикрепленные к лодыжке, могут высокоточно отражать особенности походки во время передвижения или ходьбы, шаги, пройденное расстояние, скорость и расход энергии.

Носимые датчики обнаруживают ненормальные и/или непредвиденные ситуации, отслеживая физиологические параметры наряду с другими показателями [23]. Таким образом, как трекинг физических нагрузок, так и необходимая медицинская помощь может быть оказана человеку в любое время. Огромное количество решений разработано специально для спортсменов-любителей и профессионалов. Последние технологические решения отражены в профильном обзоре [24].

1.3. СЕРДЕЧНЫЙ РИТМ, ЧАСТОТА И ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ

Сейчас принято говорить, что новая эра здоровья, ориентированного на потребителя, обладает большими преимуществами в профилактике, диагностике и лечении сердечно-сосудистых заболеваний [10]. В настоящее время ряд проблем сдерживает широкое использование носимых

технологий в клинической практике. Однако сенсорные и вычислительные технологии продолжают развиваться, поэтому носимые устройства будут развиваться и станут неотъемлемой частью арсенала диагностики сердечно-сосудистых заболеваний [25]. Качество этих устройств должно регулироваться политикой надзора для обеспечения безопасности и эффективности. Поскольку COVID-19 вывел нас на новый этап удаленного и децентрализованного ухода за пациентами, практическое руководство для клиницистов и врачей может облегчить интеграцию этих устройств в работу.

Есть ряд алгоритмов и подходов, ассоциированных с диагностикой кардиоизменений, рисков развития сердечно-сосудистых заболеваний у пациентов. Эти данные могут быть использованы для разработки моделей на основе ИИ для управления рисками здоровья.

К сенсорам, совмещенным с кардиодиагностикой, относятся:

1. Датчики активности. Физическая активность обратно коррелирует с неблагоприятными сердечно-сосудистыми осложнениями [26]. Оценка уровня физической активности традиционно была субъективной — и если вообще регистрировалась, то только во время визитов в поликлинику, связанную с уже начавшимися заболеваниями. Этот подход ограничен отсутствием достаточной детализации, предвзятостью припоминания и неспособностью объективно оценить физическую активность в реальной среде. Распространенные утверждения, такие как «Я хожу пять раз в неделю по 30 минут», не включают важную информацию, такую как интенсивность физической активности, расстояние и время сидячего образа жизни, поскольку цифровые тенденции в области здравоохранения, такие как носимые устройства и смартфоны, могут объективно и точно оценивать физическую активность и расход энергии с помощью различных датчиков.

2. Трехосевой акселерометр является основным методом мониторинга активности в носимых устройствах и измеряет динамическое линейное ускорение в трех разных плоскостях. Другим важным датчиком является гироскоп, который измеряет инерционное угловое движение [27]. Общий принцип работы трехосных акселерометров основан на сейсмической массе, прикрепленной к системе механической координатной подвески. В этих устройствах используется второй закон Ньютона, согласно которому отклонение массы в противоположном направлении движения с определенным ускорением может быть измерено электрически.

Тремя наиболее распространенными типами акселерометров являются пьезорезистивные, пьезоэлектрические и дифференциальные емкостные акселерометры. При этом дифференциальный емкостной акселерометр чаще всего используется в носимых устройствах. К преимуществам этих акселерометров относятся низкое энергопотребление, быстрая реакция на движение и более высокая точность по сравнению с пьезорезистивной моделью, которая может быть снижена из-за ее температурной чувствительности.

Место ношения сенсора на теле человека является одним из важнейших факторов, влияющих на точность измерений любого акселерометра. Расположенный на груди датчик допускает наименьшую вероятность ошибки по сравнению с другими местами ношения устройств. Датчик на щиколотке лучше подходит для измерения шагов и расхода энергии. Тем не менее размещение на запястье имеет приоритет над размещением на лодыжке в коммерческих носимых устройствах из-за большего удобства, дополнительных функций [28].

Стоит отметить, что с 2021 года многие компании стали проходить лицензирование и одобрение у надзорных организаций. Утвержденная FDA

электрокардиограмма (ЭКГ) в Apple Watch и Omron может обнаруживать признаки мерцательной аритмии, а также регулярно проверять нерегулярное сердцебиение [29].

Кольцо NFC OPN [30] для отслеживания показателей ритма [31] является водонепроницаемым и может управлять приложениями вашего смартфона (работает как с iOS, так и с Android), блокировать и открывать двери, передавать данные и даже заботиться о ваших бесконтактных платежах. Они еще не такие умные, как Apple Watch, но они намного дешевле и не требуют подзарядки. Вы можете купить его менее чем за 20 долларов на официальном сайте.

Измерение частоты сердечных сокращений (ЧСС) во время отдыха и физических упражнений можно использовать для прогнозирования риска сердечно-сосудистых заболеваний. У здоровых людей высокая ЧСС в состоянии покоя связана с повышенным риском ишемической болезни сердца и всех причин смерти, а также с изменением в динамике и процессе восстановления частоты — показатель неблагоприятных исходов у пациентов с сердечной недостаточностью [32].

Нарушение восстановления показателей сердечного ритма — превентивный показатель, который очень значим для преκληической практики.

Коммерческие носимые устройства измеряют ЧСС и сердечный ритм с помощью электрокардиографии (ЭКГ) или фотоплетизмографии (ФПГ), вычисляя временные интервалы между ударами и используя алгоритмы для классификации сердечного ритма. Датчики ЭКГ бывают различных форм и являются золотым стандартом для измерения ЧСС и сердечного ритма. Нагрудные мониторы и наклейки для ЭКГ обеспечивают непрерывный мониторинг сердечного ритма, но менее привлекательны для среднего потребителя, чем другие варианты, такие как умные часы, из-за их громоздкости, ограниченных функций и длительного неудобства.

Некоторые смарт-часы могут при необходимости записывать ЭКГ в одном отведении, если поместить контралатеральный палец на заводную головку (отрицательный электрод сбоку часов), при этом задняя часть часов служит положительным электродом [33]. ЭКГ с одним отведением полезна для диагностики простых и распространенных аритмий, таких как мерцательная аритмия (ФП). Тем не менее этих ЭКГ в одном отведении часто недостаточно для точной диагностики более сложных аритмий и других состояний, таких как инфаркт миокарда (ИМ), или для обнаружения аномалий интервалов, если только не используются специфические методы.

1.4. ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИЯ

Фотоплетизмограмма измеряет изменения в объеме крови в микрососудах, которые преобразуются в пульсовые волны и запись тахограммы. Излучатель посылает непрерывный импульс фотонов через кожу, а фотоанализатор измеряет переменную интенсивность фотонов, отраженных в тканях [34]. Большинство носимых устройств постоянно активизирует измерение ФПГ во время нагрузки или тренировки, тогда как во время отдыха и сна измерения фотоплетизмограммы происходят только периодически, чтобы продлить срок работы батареи. Тахограммы на основе ФПГ, особенно в сочетании с ЭКГ, также могут определять наличие аритмии [35]. Разумеется, сам метод имеет ограничения. Главный недостаток заключается в том, что датчик лучше всего работает при прямом контакте с кожей, а для носимых устройств это условие не всегда соблюдается, что влияет на точность измерений. Также оттенок кожи, влажность и даже татуировки влияют на точность измерения ФПГ.

Учитывая изменчивость точности ЧСС и датчиков ФПГ на разных носимых устройствах, в ряде исследований проводится прямое сравнение их производительности. Нагрудный ремень показывал наилучшее соответствие стандартной ЭКГ при всех нагрузках. Точность наручных устройств

и браслетов существенно различалась в зависимости от типа активности, и 5% измерений ЧСС были значительно неточными. Вышеприведенные исследования подчеркивают, что показания ФПГ и ЧСС с наручных устройств во время активности следует интерпретировать с осторожностью, тогда как менее удобные нагрудные мониторы более точны. Таким образом, необходимы дальнейшие исследования новых устройств и их производительности в различных группах населения, чтобы лучше понять ограничения технологии ФПГ и улучшить ее производительность.

Ряд ограничений, таких как вероятность неточности устройств, конфиденциальности пациентов, стоимости, а также поиска способов отделить полезные данные от шума, по-прежнему препятствует широкому внедрению носимых устройств в клиническую практику. Эти проблемы решаемы в случае усовершенствования существующих технологических решений.

1.5. СТРЕСС

Одним из маркеров изменений ментального здоровья являются адаптивные показатели стресса [36]. Многие производители носимых устройств включают в свои приложения данные на основе частоты и вариабельности сердечного ритма, реактивных при стрессовых факторах. Стресс (эустресс — хороший стресс) полезен для качества жизни. Интересные впечатления, спортивная нагрузка, когнитивная нагрузка относятся к маркерам хорошего стресса, но надо учитывать, что эти показатели индивидуальны.

Плохой же стресс (дистресс), вызывающий нейровоспаление и дисбаланс нейромедиаторных и гормональных систем, является запускающим процессом многих патологических заболеваний, включая онкологические. Эти показатели стресса определяются индивидуально и могут отслеживаться в режиме онлайн. Оптимально будет в дальнейшем использование

фронтир-технологий для определения биомаркеров стресса [37]. Подробно о неинвазивном измерении уровня кортизола как показателя стресса на физиологическом уровне будет описано в разделе фронтир-технологий.

1.6. БИОИМПЕДАНС

Анализ биоэлектрического импеданса (BIA) используется для выявления состава тела человека путем подачи небольшого переменного тока через тело и измерения импеданса. Чем меньше электрод устройства BIA, тем больше ошибка измерения импеданса из-за контактного сопротивления между электродом и кожей человека. Поэтому в большинстве коммерческих устройств BIA используются достаточно большие электроды (например, $4 \times 1400 \text{ мм}^2$), чтобы противодействовать эффекту ошибки из-за контактного сопротивления. Новый метод [38] использует компенсации контактного сопротивления путем поочередного выполнения 4-точечных и 2-точечных измерений, что позволяет точно оценить импеданс тела даже при использовании электродов значительно меньшего размера (внешние электроды: 68 мм^2 , внутренние электроды: 128 мм^2). Кроме того, использование носимого на запястье устройства BIA коррелирует с результатами клинических испытаний у 203 участников в больнице Святой Марии. Коэффициент корреляции и стандартная ошибка оценки процентного содержания жира в организме составили 0,899 и 3,76% соответственно по сравнению с двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрией. Этот результат превышает уровень производительности коммерческого портативного анализатора жира (Omron HBF-306) [39].

Возможности такого трекинга оцениваются как весьма перспективные для клиницистов и пациентов [40, 41].

1.7. СОН/ВОССТАНОВЛЕНИЕ

Технологии позволяют с помощью стандартных сенсоров и специальных алгоритмов отслеживать фазы сна и давать рекомендации по оптимальным периодам восстановления. Здоровый сон лежит в основе хорошего ментального и физического здоровья, он также важен для работы иммунной системы [42].

Сравнительный анализ традиционных методов диагностики и неинвазивных носимых устройств, недавно разработанных носимых систем для мониторинга сна приведены и оценены в обзорах [43, 44].

В первую очередь диагностика и прогнозирование циклов сна у неинвазивных носимых устройств решаются при помощи алгоритмов машинного обучения обработки данных. Получение данных основано на работе стандартных сенсоров пульса, движения, угла наклона, работы сосудов и пр. Короткий и прерывистый сон может быть связан с несколькими опасными для здоровья заболеваниями. Почти один миллиард человек во всем мире страдает синдромом обструктивного апноэ сна (СОАС) [33]. Тем не менее большинство людей даже не знают об этой особенности из-за того, что современные диагностические методы медицины сна трудоемки, занимают большое количество времени и не подходят для самостоятельного применения [45].

Одним из самых удобных для трекинга сна коммерческие компании признают Смарт-кольцо Oura [46, 47]. Оно не мешает во время сна, и компания специализируется на алгоритмах и рекомендациях по улучшению качества сна. Оно работает с постоянным мониторингом сердечного ритма в реальном времени, датчиками температуры, трекинга сна и анализом активности. Что касается одного из подходов к снижению уровня смертности, в настоящее время разрабатываются решения, позволяющие предотвратить последствия хронических заболеваний, которые увеличивают

риски сердечного приступа или инсульта во время сна при повышенном кровяном давлении. Диагностика подобных заболеваний на ранней стадии очень важна. Первый шаг перед постановкой диагноза — измерения: как лабораторные, так и превентивный самостоятельный контроль. В связи с увеличением возраста населения улучшение систем самостоятельного контроля здоровья в настоящее время необходимо больше, чем даже десятилетие назад. Кроме того, традиционные методы измерения параметров здоровья, такие как полисомнография, не всегда удобны и доступны и влекут за собой дополнительные расходы. Таким образом, в современных передовых устройствах для самоконтроля здоровья прикладные технологии и научные разработки объединяются для создания устройств, которые можно использовать для диагностики и мониторинга физиологических параметров человека. Развитие алгоритмов машинного обучения обеспечивает все более точные методы анализа измеряемых сигналов.

В обзоре, посвященном диагностике нарушений дыхания во сне с помощью биомедицинских датчиков, технологий и алгоритмов, приведен перечень актуальных механизмов — в первую очередь алгоритмов, которые, как предполагается, могут спасти жизни [48]. Примеры, формулы и подробное описание алгоритмов также приводится здесь [49].

Сейчас наиболее актуальны исследования, направленные на сравнение точности данных, получаемых с носимых устройств, по сравнению с лабораторной полисомнографией. Персонализированные алгоритмы продемонстрировали высокую чувствительность (94% — носимые устройства и 93% — профессиональное медицинское исследование) и точность (70% — носимые устройства и 83% — профессиональное оборудование) [127]. По сравнению с лабораторной полисомнографией «обобщенный» и «персонализированный» алгоритмы продемонстрировали хорошую чувствительность (94% и 93% соответственно) и специфичность (70% и 83%

соответственно). Обобщенный алгоритм продемонстрировал точность 67% и 85% для легкого, глубокого и быстрого сна соответственно. Персонализированный алгоритм был точен на 81%, 95% и 92% для легкого, глубокого и быстрого сна соответственно [29]. Развитие технологий сенсоров, алгоритмов и сбор данных позволит в будущем разработать более совершенные системы, но в рамках домашнего контроля во время ночного периода использование носимых устройств может быть рекомендовано уже сейчас.

2. АНАЛИЗ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ ИМПЛАНТИРУЕМОЙ НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

К новым технологиям в области имплантируемых и носимых датчиков контроля здоровья относятся типы сенсоров и устройств, для которых пока не разработана модель массового производства. В настоящее время акцент в разработке носимых технологий смещается от потребительских аксессуаров к более специализированным и практическим приложениям.

Изменяющие жизнь приложения в носимых технологиях можно найти в медицинских устройствах. Так, в последние несколько лет наблюдается быстрое развитие и внедрение носимых технологических продуктов, адаптированных для использования в медицине и здравоохранении. В этом случае огромной областью роста носимых технологий является укрепление здоровья потребителей; при этом целью является не только улучшение физической формы, но и применение датчиков медицинского применения, которые можно найти в потребительских носимых устройствах, предназначенных для спасения жизней.

2.1. НЕИНВАЗИВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ГЛЮКОЗЫ

Важно понимать, что, по данным ВОЗ, ситуация с нарушениями метаболизма глюкозы оценивается как весьма устрашающая [50], в том числе из-за связи таких нарушений: сердечно-сосудистых заболеваний, гормонально-инсулинозависимых видов рака [51] и снижения иммунитета [52].

Для измерения уровня глюкозы используется спектроскопия электрохимического импеданса (EIS) — это метод, используемый для анализа межфазных свойств, связанных с событиями биораспознавания, происходящими на поверхности электрода, такими как распознавание антите-

ло-антиген, взаимодействие субстрат-фермента или захват всей клетки. EIS можно использовать в нескольких важных биомедицинских диагностических и экологических приложениях, хотя этот метод является одним из самых сложных среди электрохимических. Использование наноматериалов, таких как наночастицы, нанотрубки, нанопроволоки и нанокомпозиты, обеспечило каталитическую активность, повышенную иммобилизацию чувствительных элементов, которая способствовала более быстрому переносу электронов, а также повышению надежности и точности заявленных датчиков EIS. Таким образом, EIS использовалась для эффективного количественного и качественного обнаружения патогенов, ДНК, биомаркеров, связанных с раком, и т. д. В статье [53] представлен интенсивный обзор литературы, чтобы подчеркнуть влияние наноматериалов на улучшение аналитических характеристик импедиметрических биосенсоров. Эта технология импедансной спектроскопии используется в Pendra, GlucoWatch.

Конечно, исследования продолжают для определения точности отслеживания уровня глюкозы и установления корреляций нарушений обмена глюкозы с другими заболеваниями и нарушениями функциональных состояний [54]. Стоит отметить, что рынок и заинтересованность в подобных устройствах неинвазивного определения уровня глюкозы будут продолжать расти [13, 55].

Важно понимать, что, по данным ВОЗ, во всех странах лидирует смертность от сердечно-сосудистых заболеваний. Метаанализ за период 2007—2017 годов [56] показал, что сердечно-сосудистые заболевания затрагивают около 32,2% всех людей с сахарным диабетом второго типа. Проблемы сердечно-сосудистой системы — это основная причина смертности у людей с диабетом. Половина всех смертей у диабетиков за период исследования произошла или из-за ишемической болезни сердца или из-за инсульта, что говорит нам о необходимости контроля уровня глюкозы и о

его глобальной важности для здоровья и долголетия. При этом одной из причин, провоцирующих развитие сахарного диабета второго типа и инсулинорезистенции, в свою очередь, является негативный стресс, или дистресс. Важно превентивно контролировать связанные с ним показатели, отражающие уровень глюкокортикоидов, кортизола и изменения работы сердца, при которых смертность возрастает в 2,5 раза [30, 57, 58, 59].

2.2. ДАННЫЕ СРЕДЫ

Одним из главных трендов сейчас стало функциональное совмещение различных видов датчиков и внешних сенсоров для улучшения анализа самочувствия человека в среде. Особенно это актуально для опасных производств или экологически неблагополучных районов. В Луисвилле, штат Кентукки, используется совмещенный анализ данных с датчиков среды (экологии) и здоровья. Носимые устройства, произведенные AIR Louisville, используются для мониторинга качества местного воздуха, измерения загрязняющих веществ и выявления горячих точек для жителей с респираторными проблемами.

Для токсичных производств необходимы носимые датчики контроля данных окружающей среды. Совместно с данными среды, полученными с носимых датчиков, может быть создан дополнительный мониторинг безопасности на токсичных производствах или в районах с более плохой экологической ситуацией. Эта технология относится к инфраструктурным решениям. В основном на уже хорошо зарекомендовавших себя сенсорах используются модели искусственного интеллекта или машинного обучения [60, 61].

2.3. ГИДРАТАЦИЯ

Обезвоживание или недостаточная гидратация — скорее поведенческая проблема, поскольку люди просто не обучены поддерживать гидратацию. Вода помогает производительности, физической и когнитивной деятельности. Улучшает здоровье кожи и метаболизм. Это помогает быстрее восстанавливаться, избегать травм и проблем со здоровьем.

С помощью метода, аналогичного оптическому монитору сердечного ритма, сенсор просвечивает кожу лучом с определенной длины волны и измеряет степень гидратации кожи на разных уровнях, так что пользователь может получить информацию об общей гидратации тела, а не просто данные о поверхностном увлажнении кожи. Таким образом, пользователь получает напоминание, что следует выпить воду, прежде чем действительно чувствуется жажда. Эта технология уже используется в Японии в аграрном секторе и разработана российской компанией Healbe. Решение поставлено на рынок, но исследования в этой области продолжаются. Также есть американский стартап Sixty, который недавно объявил о сотрудничестве с Britvic и занимается популяризацией идеи правильной гидратации. Текущий макет исходного устройства Sixty в настоящее время выглядит как очень простой монитор с точки зрения отображения и информации, с блоком светодиодов в качестве индикаторов уровня гидратации.

2.4. УРОВЕНЬ ХОЛЕСТЕРИНА

Сердечно-сосудистые заболевания обременительны для системы здравоохранения из-за связанных с этим затрат на лечение. Регулярный скрининг на холестерин может помочь определить начало и/или наличие сердечно-сосудистых заболеваний. Система спектрокапнографии может определять концентрацию $p\text{CO}_2$ и изопрена, чтобы измерять уровень холестерина ($\text{C}_{27}\text{H}_{46}\text{O}$), присутствующего в крови. Для этого создан не-

дорогой прототип спектрокапнографии с использованием сети беспроводных датчиков, которая обеспечивает регистрацию частоты сердечных сокращений и дыхания с использованием сигнала электрокардиографии. Также это устройство использует технологию Zig-Bee для отображения биомедицинских сигналов на мобильных устройствах [62].

В исследовании, финансируемом Министерством исследований и инноваций Румынии [63], в качестве сенсоров для медицинской оценки уровня холестерина используется электрохимический метод в сочетании с реакцией Либермана-Бурхарда как инновационный и простой подход к определению холестерина с высокой чувствительностью и селективностью. Электрохимические реакции и процедуры по сравнению с другими методами анализа являются дешевыми, быстрыми и экологически безопасными. Таким образом, стоимость анализа может быть более экономичной и практичной.

Реакцию Либермана-Бурхарда можно проследить и усилить с помощью амперометрического метода, и ее можно успешно использовать для анализа холестерина в образцах сыворотки. Показано, что разработанный метод, специфичный в отношении холестерина, обладает хорошей чувствительностью определения, отличной линейностью отклика в широком диапазоне и низким пределом обнаружения. Новый метод отличают простота, быстрота, специфичность и высокая чувствительность. Он служит альтернативой используемым в настоящее время колориметрическим или хроматографическим методам, которые являются более дорогими и сложными.

2.5. ДАВЛЕНИЕ

Повышенное давление является частым заболеванием, приводящим к хронической гипертензии и другим сердечно-сосудистым заболеваниям (ССЗ).

Повышенное артериальное давление (АД) во всем его диапазоне является причиной частой смертности и инвалидности во всем мире. Нормой систолического артериального давления (САД) можно считать показатель ниже 120 мм рт. ст. Нормальным диастолическим артериальным давлением (ДАД) — показатели ниже 80 мм рт. ст.

Датчики артериального давления предрекают вступление в новую эру неинвазивного подхода к оценке уровня давления в реальном времени [64] и предоставления данных в реальном времени клиницисту и пациенту. Риски сердечных заболеваний являются приоритетным направлением исследований и разработок из-за максимальной смертности от них и из-за частой бессимптомности [32, 65].

Артериальная гипертензия является ведущей причиной развития других нарушений здоровья и смертности во всем мире. Включение измерения артериального давления в носимые устройства потребительского класса может улучшить скрининг гипертензии и выявить ночную гипертензию или гипертензию при физической нагрузке. Наручные часы HeartGuide (Omron, Япония) со встроенной манжетой сравнивали с амбулаторным прибором для измерения АД в офисных и амбулаторных условиях. Для измерения АД пациенты сидели и носили наручные часы HeartGuide и стандартное устройство для измерения АД в одной и той же недоминантной руке, и показания АД измерялись дважды каждым устройством с чередующимися 30-60-секундными интервалами. Для амбулаторного измерения АД пациентам давали амбулаторный аппарат для измерения АД на плече, который фиксирует АД с 30-минутными интервалами в течение 24 часов, и им предписывалось использовать устройство HeartGuide после каждого амбулаторного измерения АД не менее 10 раз в состоянии бодрствования. Среднее стандартное отклонение систолического АД между обеими группами составила $0,8 \pm 12,8$ мм рт. ст. в амбулаторных условиях и $3,2 \pm 17,0$ мм рт. ст. в амбулаторных условиях. Эти результаты согласуются с ранее

описанными ограничениями измерения АД с помощью манжеты на запястье. Важно, что теперь АД можно измерять и без манжеты при помощи носимых сенсоров, что повышает доступность и простоту мониторинга АД в течение дня. Эта технология использует комбинацию измерений ФПГ и ЭКГ для оценки АД путем расчета частоты пульса, необходимой для прохождения волны артериального давления от сердца к удаленному сосуду. В небольшом исследовании измерения АД без манжеты сравнивались с измерениями с помощью амбулаторных устройств. Среднее отклонение между носимыми и амбулаторными устройствами за 24 часа составило 0,5 мм рт. ст. (от -10,1 мм рт. ст. до 11,1 мм рт. ст.) для систолического АД и 2,24 мм рт. ст. (от -17,6 мм рт. ст. до 13,1 мм рт. ст.) для диастолического АД, при этом среднее отклонение увеличилось за 7 дней до -12,7 мм рт. ст. для систолического АД и -5,6 мм рт. ст. для диастолического АД. Также было рассмотрено несколько других переменных для измерения АД без манжеты, таких как скорость и распространение пульсовой волны в сочетании с алгоритмами глубокого обучения, однако большинство исследований ограничены небольшими размерами выборки и отсутствием внешней проверки [66]. Несмотря на обнадеживающие результаты, мониторинг АД без манжеты все еще находится в зачаточном состоянии и требует дальнейшего изучения [67], а также дополнительной валидации с традиционными методами [68]. Исследователи Стэнфорда оптимистично смотрят на возможности использования носимых устройств для измерения АД и предиктивного здоровья [69]. Развернутый критический обзор подходов по неинвазивному измерению артериального давления был опубликован в 2021 году [70]. Точное измерение артериального давления имеет важное значение для профилактики и лечения заболеваний у пациентов с артериальной гипертензией. Сложность в том, что ряд симптомов скрыт и требует постоянного контроля. Сердечный приступ, инсульт или повреждение почек могут произойти без симптомов, и неинвазивный по-

стоянный контроль может снижать эти риски. Особенно важен домашний тонометр гипертоникам 2 стадии (140–90 мм рт. ст.) из-за необходимости отслеживать свое артериальное давление дома.

В медицине неинвазивно используют сфигмоманометр для оценки давления, после чего анализируют тоны Короткова (звук К). К сожалению, этот метод не автоматизирован и требует участия врача, медсестры или обученного пациента.

В автоматизированных тонометрах используется манжета для оценки АД. Прибор показывает колебания давления во время сдувания манжеты с помощью встроенного датчика давления. Тогда среднее артериальное давление оценивается с помощью амплитуды колебаний. Принятые международные нормы, которые распространяются на устройства с манжетой, и как их можно адаптировать к более простым носимым устройствам для измерения давления описаны в обзоре [67].

Другой неинвазивный метод измерения АД — использование двух сигналов фотоплетизмограммы. Эти данные предварительно обрабатываются для удаления артефактов движений. Для уточнения данных используются нелинейные подходы к математической модели реакции-диффузии [71].

Для анализа и обработки данных в носимых устройствах в первую очередь сейчас используют алгоритмические подходы машинного обучения (МО), которые делают возможным измерение АД при помощи неинвазивного, безманжетного подхода. Метод МО измеряет АД посредством персонализированного анализа динамических данных фотоплетизмограммы. Сами сенсоры могут быть встроены в корпус браслета или часов, а также для аналога фотоплетизмограммы используют данные камер мобильных телефонов, например приложение Welltory. Данные обрабатываются с помощью специальной математической модели МО или каскада моделей

для оценки систолического и диастолического давления. В этом случае результаты показали точность около 97% [72]. Существуют разные алгоритмы МО и тестирование результатов на точность, использование которых зависит от разработчика, производителя и типов сенсоров [73, 74, 75]. Неинвазивные автоматизированные методы мониторинга давления именно в режиме реального времени [76] и предоставляемые ими возможности определенно значимы для самостоятельной профилактики заболеваний.

2.6. УМНАЯ ОДЕЖДА С ДАТЧИКАМИ

Недавнее пополнение в семействе интеллектуальных носимых устройств — умная одежда. Есть множество разработок для профессионального использования, спорта высоких достижений, модных экспериментов. Эта одежда поставляется с датчиками, которые измеряют различные показатели вашего тела и отправляют вам уведомления, если что-то не так или выходит за рамки нормы. Не являются зрелой и удобной технологией и пилотные проекты, которые тестировались на металлургические предприятия России, столкнулись со сложностями (разный размер одежды, повреждение при стирке и пр.). И функции умной одежды лучше выполняют умные часы и браслеты с соответствующими приложениями.

2.7. COVID-19 И ВОССТАНОВЛЕНИЕ

Поскольку мир переживает пандемию и международная система здравоохранения находится в сложной ситуации из-за коронавирусной инфекции (COVID-19), системам здравоохранения всех стран требуется легкодоступное, недорогое и высокоточное оборудование для быстрой диагностики, наблюдения и лечения этого заболевания. Дополнительную помощь в анализе и лечении могут взять на себя носимые устройства. Прогресс в исследованиях и разработках на основе МЭМС (датчиков на

основе микроэлектромеханических систем MEMS) в последние годы привел к совершенствованию работы оборудования, используемого в биомедицинских целях. Датчики МЭМС [77] превосходят обычные датчики из-за их небольшого размера (1 мкм — 1 мм), незначительного веса, быстрого отклика, точных измерений, портативности и простоты интеграции с электронными схемами.

Микрофлюидика (лаборатория на чипе) и датчики МЭМС в настоящее время широко используются для быстрого и точного обнаружения, мониторинга прогрессирования и лечения различных заболеваний, включая COVID-19. Непрерывная миниатюризация и усовершенствование конструкции привели к созданию более точных датчиков и исполнительных механизмов для приложений здравоохранения даже для микро- и наноразмерных измерений при доставке лекарств в других инвазивных приложениях. Обзор датчиков МЭМС, которые используются или могут быть использованы в важном оборудовании для обнаружения и лечения COVID-19 или других пандемий [78].

2.8. ДРУГИЕ РАЗНООБРАЗНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ НОВЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ЗДОРОВЬЯ

Активно развиваются технологии на базе алгоритмов искусственного интеллекта, которые позволяют по-другому смотреть на получение и обработку биомедицинских данных.

Есть ряд проектов, которые могут быть интересными, но требуют дополнительной информации и исследований. Приведем несколько примеров:

- Syrcadia Health разработала iTBra — интеллектуальный пластырь, который может выявлять ранние признаки рака молочной железы и передавать информацию в лабораторию для анализа.

- Косметическая компания L’Oreal продает УФ-пластырь My Skin Track, который указывает на то, что вы подверглись вредному воздействию УФ-лучей.
- Обручи для получения неинвазивных данных электроэнцефалограммы (ЭЭГ) представлены на рынке, например носимый нейрообруч Muse [79]. Вопрос по точности этих данных пока открыт и пока может использоваться для медитации и процедур, не связанных с заболеваниями и патологиями [80]. Как новатор домашних установок ЭЭГ, Neurotech [81, 82] является интересным игроком в отрасли ЭЭГ. Решение ЭЭГ компании выполняет как рутинные, так и долгосрочные исследования ЭЭГ, которые можно записывать. Результаты доступны для просмотра в инновационной базе данных врачей Neurotech. Есть и другой весьма интересный подход. Сама идея неинвазивного носимого сканирования мозга интересует многих исследователей [83]. Одной из перспективных технологий — метод носимых магнетометров без сверхпроводящих квантовых интерферометров (англ. SQUID, Superconducting Quantum Interference Device) — является разрабатываемая в лабораториях SberDevice Сбербанка [84] под руководством Александры Бернадотт. В компании «Интел» до недавнего времени разрабатывались специальные процессоры для такого типа устройств. Поскольку они носят частично теоретический характер, косвенно относятся к сенсорам и не связаны с этапами диспансеризации, мы не будем останавливаться на них подробно. И при необходимости технология может быть описана развернуто.

3. АНАЛИЗ ФРОНТИР-ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ ИМПЛАНТИРУЕМОЙ И НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Быстрый прогресс в миниатюризации электронных устройств позволяет удобно и детально отслеживать состояние здоровья. Уже сейчас можно купить носимые датчики, встроенные в смарт-часы и браслеты. Такие устройства могут собирать и анализировать данные днем и ночью, чтобы улучшить самочувствие владельцев. Например, как говорилось ранее, они могут контролировать такие параметры, как сердцебиение и насыщение крови кислородом, сон, движение, стресс и пр. Одно из интересных направлений — применение электронного волокна из нанотрубок и графена. Мы можем отнести их к фронт-технологиям, так как это новые типы сенсоров, новые инфраструктурные решения, материалы и подходы, для которых пока не разработана модель производства.

Ожидается, что технологии на основе графена в будущем расширят возможности анализа уровня глюкозы, ЭКГ, ЭЭГ, электромиографии, измерения температуры, увеличивая точность и легкость использования [85]. Ограничения использования таких технологий связаны с тем, что ряд видов материала может быть токсичным и износостойким. MIT разрабатывают алгоритмы для анализа данных сенсорного волокна [86]. Российские инвесторы, как, например, Газпромбанк, инвестируют в компанию — разработчика сверхчувствительных магнитных сенсоров для медицинских применений QLU. Пока информация ограничена и требует дополнительных исследований [87].

Из российских проектов также стоит упомянуть патент и разработку носимого неинвазивного МЭГ, проект подразделения SberDevice Сбербанка [84]. Процессор для процессинга данных разрабатывается компанией Intel

[88]. Сверхчувствительный микродатчик для медицинских анализов разработан в лаборатории МИСиС [89].

3.1. БИОХИМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Биохимические сенсоры [10] могут измерять электролиты жидкости организма с помощью электрохимических преобразователей, предлагая ценную информацию о статусе объема плазмы и концентрации анализируемого вещества. Важно отметить, что точность этих датчиков меняется в зависимости от температуры кожи, загрязнения кожи пылью, высохшим потом, густоты волос или других слабо контролируемых причин. Одним из примеров биохимических сенсоров являются минимально инвазивные непрерывные мониторы глюкозы, которые прошли клинические испытания, но их трудно встроить в носимые устройства потребительского класса и они в основном функционируют как медицинские устройства. Правда, сейчас за счет того, что такие компании, как Omron, проходят сертификацию сенсоров по стандартам медицинских устройств, эта грань начинает размываться. Неинвазивные датчики пота и слюны могут быть более практичными для интеграции в носимые устройства, но они в самом начале клинических испытаний на точность данных. Другие биомеханические датчики, такие как гибкие, похожие на татуировки датчики на основе микрофлюидики, также перспективны для неинвазивного гемодинамического непрерывного мониторинга.

3.2. ЭПИДЕРМАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Эпидермальная электроника — это развивающаяся область носимых технологий, названная по своим свойствам и поведению, сравнимым со свойствами эпидермиса или внешнего слоя кожи. Эти носимые технические устройства крепятся непосредственно на кожу для мониторинга физиологических и метаболических процессов — как кожных, так и под-

кожных. Беспроводная связь обычно достигается с помощью батареи, Bluetooth или NFC, что делает эти устройства удобными и портативными в качестве носимых технологий.

В настоящее время использование эпидермальной технологии ограничено существующими производственными процессами, а эпидермальная электроника разрабатывается для фитнеса и медицинского мониторинга.

«Механически невидимая» для владельца, тонкая, мягкая, гибкая конструкция эпидермальной электроники напоминает временные татуировки, нанесенные на кожу.

Несколько материалов используется для достижения свойств кожи: фотолитографический узорчатый серпентин, золотая нанопленка и узорчатое легирование кремниевых наномембран.

Предполагается, что эпидермальная электроника в будущем может быть оптимальным источником данных о состоянии человека в реальном времени [90].

Умные татуировки, содержащие гибкие электронные датчики, разработаны для контроля сердечной и мозговой деятельности, нарушений сна и работы мышц.

Так разрабатывается татуировка-сенсор на основе графена для определения близости, использующая принцип электростатического стробирования. Датчик демонстрирует самую высокую зарегистрированную дальность обнаружения приближения — 20 см. Также исследуется возможная роль датчика как системы оповещения о несанкционированном контакте с объектами в общественных местах, особенно во время текущей пандемии COVID-19 [91, 92].

Графеновые электронные татуировки (GET) недавно стали уникальными инструментами для персонализированного здравоохранения. Монос-

лойные GET использовались для мониторинга электрофизиологических сигналов человека, включая активность мозга, сердца и мышц, температуру кожи и уровень гидратации. Однако несколько недостатков, более ранних GET, препятствовали их восприятию клиническими и биомедицинскими экспертами: они не пропускали пот, а эффективность регистрации данных при помощи татуировки сильно различалась [26]. Недавно появилось новое поколение GETs 2.0: датчиков-татуировок, которые можно носить на коже, с превосходными электрическими свойствами, проницаемостью для пота и надежностью. При объединении монослоев графена в одну татуировку происходит резкое улучшение их электронных свойств. Новый тип датчиков с добавлением графеновых наносвитков (GNS) или многослойных (2L и 3L) графеновых структур демонстрирует снижение поверхностного сопротивления в 3,5 раза, поверхностного импеданса в 2,5 раза и уменьшенных в 5 раз стандартных отклонений этого значения. Отверстия в татуировке обеспечивают нормальное испарение пота без существенного ухудшения электрических свойств. Также микроотверстия обеспечивают улучшенный биплоскостной контакт с графеновыми татуировками. Интересно, что многослойные GET 2.0 можно использовать в качестве эффективных электронных обогревателей, которые можно носить на коже, демонстрируя эффективность нагрева $\sim 6 \text{ мВт/}^\circ\text{C}$ [19].

Эпидермальные датчики татуировки представляют собой фронтир-класс носимой электроники благодаря их тонкости и мягкости. В то время как первые поколения графеновых сенсоров были основаны на тонких металлических пленках, кремниевой мембране или печатных чернилах на основе наночастиц, появилось второе поколение мультимодальных электронных датчиков-татуировок толщиной менее микрометра, которые сделаны из графена. Графеновая электронная татуировка разработана в виде нитевидных змеевиков и изготовлена экономичным и эффективным по времени методом «мокрый перенос, сухое рисование».

Он имеет общую толщину 463 ± 30 нм, оптическую прозрачность $\sim 85\%$ и растяжимость более 40%. GET можно наносить непосредственно на кожу человека как временную татуировку, и она может полностью соответствовать микроскопической морфологии поверхности кожи только за счет сил Ван-дер-Ваальса. Структура GET с открытой сеткой делает ее воздухо- и потопроницаемой. Непокрытая защитным составом GET может оставаться прикрепленной к коже в течение нескольких часов без перелома или расслоения. При покрытии жидкой повязкой GET может оставаться на коже в течение нескольких дней. В качестве сухого электрода импеданс интерфейса GET-кожа находится на одном уровне с используемыми в медицине гелевыми электродами из серебра/хлорида серебра (Ag/AgCl), обеспечивая при этом комфорт, мобильность и надежность. GET успешно применяется для измерения электрокардиограммы, электромиограммы (ЭМГ), электроэнцефалограммы, температуры кожи и гидратации кожи [93].

3.3. ИЗМЕРЕНИЕ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ

Существует множество способов измерения внутриглазного давления (ВГД). Важно отметить, что при ведении и лечении пациентов с глаукомой предпочтительнее и надежнее измерять ВГД каждый раз с помощью одного и того же типа оборудования для каждого отдельного пациента с глаукомой. Некоторые инструменты имеют особые преимущества по сравнению с классической тонометрией Гольдмана. Альтернативные системы, описанные в литературе, либо неинвазивные, либо имплантируемые, остаются экспериментальными. Несмотря на многообещающие предварительные результаты, ни один из них не получил широкого распространения и не может быть адаптирован в рутинных клинических условиях. Таким образом, примеры доказывают, что новое не всегда лучше. Тонометр Гольдмана остается самым надежным инструментом, несмотря

на его ограничения и отсутствие новаторских достижений за последние 70 лет [94].

Пока ведутся предварительные эксперименты с графеновыми сенсорами измерения ВГД на животных [95]. Сочетая в себе высокую чувствительность к деформации и прозрачность, тонометры для контактных линз из графеновой ткани в качестве чувствительного элемента с высоким разрешением имеют многообещающие перспективы для реализации недорогих одноразовых сенсорных контактных линз с меньшей оптической силой.

3.4. ГЕНЕТИКА И НОСИМЫЕ УСТРОЙСТВА

Новый набирающий оборот тренд — совмещение носимых технологий с данными о генетике человека. Этот подход может дать оптимальные результаты и возможности для превентивной медицины.

Другая возможность сенсорных устройств — это проведение медицинских исследований удаленно, когда информация о личной динамике передается врачу и в облаке физиологические показатели совмещаются с генетическими данными пациента.

Например, исследователи из Медицинской школы Стэнфордского университета сначала в реальном времени, а потом удаленно мониторят физиологические данные более 100 человек. Сейчас они устанавливают закономерности по обнаружению COVID-19 [96] и открыли новый подход на основе больших данных к обнаружению болезней и персонализированной медицины [50]. В их исследовании использовались данные носимых технологий, секвенирования генома, а также микробного и молекулярного профилирования, которые давали на индивидуальном уровне возможность получить более точную аналитику и построить прогностическую модель.

Сенсорные системы на основе CRISPR (анг. Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats, технология направленного редактирования генома) [27]) позволяют точно различать сигнатуры нуклеиновых кислот — применение, относительно неизведанное для носимых сенсоров. Сенсорные системы на основе CRISPR позволяют точно различать сигнатуры нуклеиновых кислот — применение, инновационное для носимых сенсоров. Датчики нуклеиновых кислот позволяют носимым устройствам обнаруживать воздействие внешних патогенов [28], маркеры повреждения клеток или даже наблюдение за раком [97]. На текущий момент системы на основе CRISPR тестировались только в носимых датчиках дыхания для обнаружения вирусов на лицевой маске [5]. Кроме того, предполагается, что мультимодальный анализ различных биожидкостей увеличит точность диагностики заболеваний [98].

3.5. ТРЕКЕРЫ ПОТА

Носимые устройства на основе анализа пота привлекают все больше внимания, предоставляя обширную физиологическую информацию и непрерывные измерения посредством неинвазивного мониторинга состояния здоровья. Давление пота, создаваемое через потовые железы, на поверхность кожи, связанное с осмотическими эффектами, может помочь выяснить такие параметры, как физиологические состояния и психологические факторы. В этом исследовании [14] представлено носимое устройство для измерения давления секрета пота посредством неинвазивного непрерывного мониторинга. Уровень давления определяется микрофлюидным чипом, который показывает отклонение сопротивления от схемы парных электродов и передает цифровые сигналы на смартфон для отображения в реальном времени. Исследование на людях демонстрирует это измерение при различных физических нагрузках, показывая диапазоны давления от 1,3 до 2,5 кПа. Это устройство удобно в использовании и

применимо для тренировок и ухода за здоровьем. В основе дальнейшего развития технологии лежат микрофлюидный подход и фронтир-технологии с графеновыми сенсорами. Комплексное использование данных, например с данными о кортизоле и гидратации [99], а также большие данные и машинное обучение могут в будущем дать модель неинвазивного анализа показателей в реальном времени [10].

3.6. АНАЛИЗ КРОВИ И СЕНСОРЫ

Анализ крови требует серьезного подхода и точности. Это одно из самых важных направлений медицинской диагностики. В настоящий момент в основном это микрофлюидика и биосенсоры [100], используемые профессионалами в лабораторных условиях. Оптические методы занимают приоритетное направление в исследовании малых молекул.

Например, анализ D-димеров в крови важен для контроля здоровья людей, переболевших COVID-19. Кроме того, этот анализ входит в список рекомендованных исследований общей диспансеризации по рекомендации департамента здравоохранения правительства Москвы.

D-димер [101] представляет собой прочную молекулу, полученную из полимерных структур, которые могут существовать либо независимо (190 кДа), либо в составе 7 различных продуктов деградации фибриногена с молекулярной массой от 240 до 530 кДа. Это разнообразие молекулярного состава представляет собой препятствие для соблюдения стандартов скорости, селективности и специфичности, установленных в устройствах для обнаружения и количественного определения обычных аналитов, таких как коммерческий сенсор глюкозы, и, следовательно, препятствует более выраженному клиническому использованию. Тем не менее, хотя эти недостатки просто замедляют процесс, вполне вероятно, что это всего лишь вопрос времени, когда самостоятельная оценка D-димера станет

более распространенной. Русская компания, представляющая инвазивные исследования в этой области [102]. На буклете компании описаны количественные и качественные подходы к определению D-димера.

Сенсорные разработки пока находятся на зачаточной стадии. К ним относится двухкомпонентный анализ для одновременного определения С-реактивного белка (СРБ) и D-димера в плазме крови человека на основе сенсорной платформы спектроскопии с интерференцией белого света [103]. Измерение выполняется в режиме реального времени путем сканирования сенсорной поверхности, на которой были созданы отдельные области антител, с помощью отражающего зонда, используемого как для освещения поверхности, так и для сбора отраженного интерференционного спектра. Состав преобразователя, процедуры химической активации и биофункционализации сенсорной поверхности были оптимизированы в отношении величины и повторяемости сигнала. Формат анализа включал прямое обнаружение СРБ, тогда как для D-димера был выбран иммунологический анализ с двумя подходами: с использованием биотинилированного репортерного антитела и реакции со стрептавидином. Значения, определенные для аналитов в 35 образцах плазмы человека, полностью согласуются со значениями, полученными для тех же образцов с помощью стандартных диагностических лабораторных приборов [64]. Отличное совпадение результатов подтвердило пригодность предложенной системы для клинического применения для обнаружения нескольких аналитов, поскольку было продемонстрировано, что на сенсорной поверхности можно создать до семи областей антител и успешно исследовать их с помощью разработанной оптической установки [103].

Для анализа различных типов белков используются безметочные оптические биосенсоры, в том числе сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР), решетчатые осветители, фотонные кристаллы, кольцевые резонаторы и интерферометрические преобразователи. В

обзоре [37] для каждого типа биосенсора сначала приводится принцип обнаружения, за которым следует описание различных конфигураций преобразователей, разработанных к настоящему времени, и их характеристик в качестве биосенсоров. Разумеется, есть ряд ограничений интегрированных оптических биосенсоров без меток. Технология требует дополнительных исследований [104]. Похожие исследования ведутся в МФТИ на кафедре биофизики [105].

При выборе биофизического оптического метода количественного определения белок-белок важно учитывать несколько характеристик. К таким характеристикам относятся применимость к различным классам биомолекул (например, белков, ДНК, гликанов и пр.), динамический диапазон молекулярной массы, сродство к связыванию и кинетика, а также разрешение стехиометрии. Хотя многие методы хорошо зарекомендовали себя в нескольких из этих областей, не было подходящего решения, которое могло бы охватить все аспекты. Кроме того, в этой области остаются фундаментальные проблемы, такие как неспецифическая адсорбция биомолекул на поверхностях или обеспечение условий равновесия. Возможно, будущее за разработками, ориентированными на методологию без меток и без иммобилизации, а также за миниатюрными приборами и автоматизацией. Эти разработки сделают методы более удобными для пользователя, доступными и, соответственно, широко применяемыми. На настоящий момент исследования ведутся по следующим направлениям:

1. Методы, основанные на иммобилизации: поверхностный плазмонный резонанс (SPR), биослоевая интерферометрия (BLI), динамическое переключение слоев ДНК.
2. Методы, основанные на делении: капиллярный электрофорез (CE), аналитическое ультрацентрифугирование (AUC), хроматография без учета размера малоуглового рассеяния света (SEC).

3. Методы, основанные на решениях: композиционно-градиентное многоугольное рассеяние света (CG-MALS), массовая фотометрия (MP) [67, 106].

Также существуют экспериментальные модели анализа уровня билирубина в крови [107].

Разработка сенсора для исследований для высокоточной онкологической диагностики по анализу мочи относится к фронтир-технологиям [108], включая Dihub [53, 89, 109].

3.7. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ КОРТИЗОЛА

Существуют фитнес-трекеры и смарт-часы, которые в реальном времени измеряют уровень стресса. В основе лежат показатели variability сердечного ритма (BCR). Это изменение временного интервала между ударами сердца. Чем выше значение variability, тем лучше работает вегетативная нервная система. К сожалению, такие измерения часто бывают зашумленными и это влияет на точность измерений. Подходы к неинвазивному измерению уровня стресс-реактивного гормона кортизола [110] различными методами также одно из высокозначимых направлений ранней профилактики заболеваний, связанных со стрессом [111].

Один из путей развития технологий для самостоятельного контроля здоровья — безопасная адаптация медицинских возможностей для более доступного и широкого использования. Это относится и к носимым устройствам, измеряющим стресс и связанный с ним показатель — кортизол [112].

Из-за небольшого молекулярного размера кортизол диффундирует и может быть обнаружен в поте. Уровни концентрации в жидкости точно отражают его ритмы и флуктуации в организме. Носимое устройство, разрабатываемое в университете Калифорнии [113], датчик пота на основе

графена определяет уровень кортизола для контроля стресса. Это происходит неинвазивно, точно и в режиме реального времени. Исследователи Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе разработали гибкую биосенсорную матрицу на полевых транзисторах (FET).

Устройство включает в себя пластиковый лист с крошечными перфорированными лазером порами, в которых скапливается пот. Анализ происходит через специальные антитела (тип молекул иммунной системы), которые могут детектировать кортизол, поскольку высоко специализированы к этому веществу. Анализ делается очень быстро — всего за несколько минут — в отличие от обычных анализов крови. Анализ крови занимает не менее одного-двух часов и требует забора крови, вызывающего стресс. Для мониторинга стресса и стресс-факторов необходим режим реального времени. Технология работает в режиме реального времени и рассматривается для массового производства [38]. Это недорогой, неинвазивный и точный метод, позволяющий широко использовать его не только для измерения стресса, но и для выявления тревожного посттравматического стрессового расстройства и депрессии. Все эти заболевания связаны с повышенным уровнем кортизола. Пациенты с депрессией и посттравматическим стрессовым расстройством имеют отличающийся от здоровых людей циркадный ритм кортизола.

В лабораторных условиях технология тестировалась двумя способами. Первый предполагал круглосуточное наблюдение за человеком в течение шести дней. Уровни кортизола повышаются и падают в течение суточного цикла, причем более высокие значения обычно наблюдаются по утрам. Данные, полученные датчиком пота, коррелируют с этим естественным циклом. Вторым подходом заключалось в том, чтобы подвергнуть участника стрессу в эксперименте. Оба подхода коррелируют с высоким уровнем кортизола. В исследовании было показано, что уровни кортизола в поте могут быть показательны относительно уровня кортизола в крови [38].

Пот часто рассматривается как одна из основ фронтир-технологий для носимых устройств. Каждая капля содержит информацию о том, что происходит с телом в реальном времени. Пот дает информацию об уровне глюкозы в крови, обезвоживании, стрессе, мышечных спазмах, высоком уровне холестерина и, предположительно, даже депрессии.

Высокий уровень кортизола в течение слишком долгого времени может вызвать проблемы со здоровьем, такие как высокое кровяное давление, нарушения сна, диабет 2 типа. Также при определенных условиях негативный стресс (дистресс) может быть онкопровокатором. Вот почему так важно поддерживать оптимальный уровень стресса.

В будущем важно разработать носимую систему, которая может собирать физиологические мультипараметровые данные с информацией о молекулярных биомаркерах в режиме реального времени.

4. МИРОВОЙ РЫНОК НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ: ТЕНДЕНЦИИ И КЛЮЧЕВЫЕ ИГРОКИ

Быстрый рост рынка носимой электроники начался в 2014 году, главным продуктом на этом рынке в это время были фитнес-браслеты. Объем рынка оценивался в 18 миллиардов долларов [114], его лидером был Fitbit с долей рынка 37,9% (см. таблицу 1). В 2021 году объем рынка носимой электроники составил 116,2 миллиарда долларов в 2021 году [115]. Структура рынка за это время существенно изменилась, лидирующее положение в общем объеме поставленных устройств заняли умные наушники (62% всех устройств носимой электроники в 2020 году [116]), доля умных часов превысила долю фитнес-браслетов. В таблице 1 представлены лидеры рынка носимой электроники в 2014 и 2021 годах.

Таблица 1. Лидеры мирового рынка носимой электроники в 2014 и 2021 годах (рыночная доля поставок носимых устройств)

| 2014 год | | | 2021 год | | |
|----------|----------|-------|----------|----------|-------|
| Позиция | Компания | Доля | Позиция | Компания | Доля |
| 1 | Fitbit | 37,9% | 1 | Apple | 30,3% |
| 2 | Samsung | 9,2% | 2 | Xiaomi | 10,2% |
| 3 | Garmin | 7,1% | 3 | Samsung | 9% |
| 4 | Xiaomi | 4% | 4 | Huawei | 8% |
| | Другие | 41,9% | | Другие | 42,5% |

Примечание. Источник: Statista (<https://www.statista.com/statistics/515640/quarterly-wearables-shipments-worldwide-market-share-by-vendor/>)

Доминирование компании Apple на рынке потребительской носимой электроники достигнуто за счет двух продуктов — наушников AirPods и умных часов Apple Watch. Рыночная доля Apple среди поставляемых устройств составляет около 30% для умных часов и 26% для умных наушников. Рыночная доля Apple в выручке выше, чем в количестве поставленных устройств. Так, для умных часов в первом полугодии 2020 года, по данным Counterpoint Research, она составляла более 50% [117].

Таблица 2. Лидеры мирового рынка умных часов и умных наушников

| Умные часы (второй квартал 2022 г.) | | | Умные наушники (первое полугодие 2020 г.) | | |
|--|----------|------|--|----------|------|
| Позиция | Компания | Доля | Позиция | Компания | Доля |
| 1 | Apple | 29% | 1 | Apple | 26% |
| 2 | Samsung | 9% | 2 | Xiaomi | 9% |
| 3 | Amazfit | 4% | 3 | Samsung | 7% |
| 4 | Imoo | 4% | 4 | JBL | 4% |
| 5 | Другие | 53% | 5 | Другие | 46% |

Примечание. Источник: Counterpoint Research (<https://www.counterpointresearch.com/global-smartwatch-shipments-market-share/> и <https://www.counterpointresearch.com/infographic-2021-hearables-tws/>)

Анализ эволюции продуктов Apple, рыночной стратегии этой компании и текущих направлений исследования и развития продуктов позволяет лучше понять текущие тенденции рынка потребительской носимой электроники.

APPLE

Умные наушники AirPods впервые были выпущены на рынок 7 сентября 2016 года. Их ключевым рыночным преимуществом было использование сенсоров и алгоритмов, обеспечивающих удобство использования наушников: они автоматически включались при начале использования и выключались при прекращении использования, определяли, когда пользователь разговаривает по телефону, и использовали направленные микрофоны для подавления окружающего шума. Эволюция AirPods представлена в таблице 3. Набор сенсоров расширился по мере появления новых поколений AirPods, однако функционал продукта оставался практически неизменным, происходило лишь улучшение существующих функций продукта. Тем не менее, судя по сообщениям в отраслевой прессе, Apple рассматривает возможности включения в будущие поколения AirPods функций, связанных со здоровьем, таких как: определение положения тела; измерение сердечного ритма; измерение температуры и слуховой аппарат [118]. Если это произойдет, это будет означать существенное расширение функционала устройств, в настоящее время исполняющих лишь функции стиля жизни (lifestyle device).

Таблица 3. Эволюция AirPods

| Поколение продукта | Дата выпуска | Сенсоры | Функции |
|--------------------|--------------------|--|--|
| Первое поколение | 7 сентября 2016 г. | Двойные оптические сенсоры. | Акселерометр распознавания движения и двойные оптические сенсоры определяют, когда AirPods находятся в ушах и запускают воспроизведение звука. |
| Второе поколение | 20 марта 2019 г. | Акселерометр распознавания движения. Акселерометр обнаружения голосовой активности. | Акселерометр обнаружения голосовой активности определяет, когда пользователь разговаривает, затем алгоритм использует направленные микрофоны, чтобы отфильтровать внешний шум. |

| Поколение продукта | Дата выпуска | Сенсоры | Функции |
|--------------------|--------------------|---|---|
| Третье поколение | 18 октября 2021 г. | Датчик контакта с кожей. Акселерометр распознавания движения. Акселерометр обнаружения голосовой активности. Датчик нажатия. | Датчик контакта с кожей используется совместно с оптическими сенсорами и акселерометром для обнаружения наушников в ушах. Он работает точнее акселерометра и оптического датчика благодаря наличию разницы давления, которая возникает при вставке в ушной канал. Если просто взять наушники в руки, разницы давления не возникнет и AirPods не включит ошибочно воспроизведение музыки. Датчик нажатия используется для управления, позволяет увеличить доступное количество команд и уменьшить количество ошибок. |

В отличие от AirPods, сохраняющих свой базовый функционал, умные часы Apple Watch с каждым поколением включают все новые функции (таблица 4). Если изначально умные часы выполняли прежде всего функционал фитнес-устройства, последние поколения во все большей степени ориентируются на функции, связанные со здоровьем. Целевая аудитория устройства расширяется: если в 2017 году Apple рассматривал в качестве целевой аудитории пользователей в возрасте от 25 до 44 лет, то после выхода четвертого поколения Apple Watch, включающих функцию построения электрокардиограммы и детектор падения, Apple включил ключевую аудиторию людей в возрасте от 44 до 54 лет. Гендерная структура целевой аудитории также изменилась — до выхода четвертого поколения доля мужчин составляла почти две трети, для последних поколений устройства она составляет менее 50% [119].

Таблица 4. Эволюция Apple Watch

| Поколение продукта | Дата выпуска | Сенсоры | Функции |
|--|---------------------|---|---|
| Первое поколение (Series 0) | 24 апреля 2015 г. | Сенсор сердцебиения. Акселерометр. | Акселерометр и гироскоп обнаруживают движения тела, позволяя собирать информацию о физической активности. |
| Второе поколение (Series 1 и Series 2) | 16 сентября 2016 г. | Гироскоп. Сенсор внешней освещенности. | Сенсор внешней освещенности позволяет часам держать экран включенным или выключенным, а также изменять яркость в зависимости от типа освещения. |
| Третье поколение (Series 3) | 22 сентября 2017 г. | Сенсор сердцебиения. Акселерометр. Гироскоп. Сенсор внешней освещенности. Барометрический высотомер. Оптический сенсор сердечного ритма. | Барометрический высотомер позволяет определять высоту, на которой находится пользователь. Оптический сенсор сердечного ритма позволяет более точно измерять частоту сердечных сокращений. |
| Четвертое поколение (Series 4) | 21 сентября 2018 г. | Сенсор сердцебиения. Акселерометр. Гироскоп. Сенсор внешней освещенности. Барометрический высотомер. Оптический сенсор сердечного ритма. Электрический сенсор пульса. | |

| Поколение продукта | Дата выпуска | Сенсоры | Функции |
|--------------------------------------|---------------------|--|--|
| | | | Электрический сенсор пульса позволяет делать электрокардиограммы (электрический). Он обнаруживает электрическую активность, пока используется приложение, предназначенное для него, и палец удерживается на цифровой короне, в которой он находится. |
| Пятое поколение (Series 5, SE 1 gen) | 10 сентября 2019 г. | | Более мощные гироскоп и акселерометр позволили создать функцию определения падения. При жестком падении пользователя или его длительной неподвижности часы отправят сигнал тревоги. |
| Шестое поколение (Series 6) | 18 сентября 2020 г. | Сенсор сердцебиения. Акселерометр. Гироскоп. | Уровень насыщения крови кислородом — важный показатель, который может помочь в оценке общего состояния здоровья и физического тонуса. |
| Седьмое поколение (Series 7) | 15 октября 2021 г. | Сенсор внешней освещенности. Барометрический высотомер. Оптический сенсор сердечного ритма. Электрический сенсор пульса. Сенсор кислорода в крови. | |

| Поколение продукта | Дата выпуска | Сенсоры | Функции |
|---|---------------------|--|---|
| Восьмое поколение (Series 8, SE 2 gen, Ultra) | 16 сентября 2022 г. | Сенсор сердцебиения. Акселерометр. Гироскоп. Сенсор внешней освещенности. Барометрический высотомер. Оптический сенсор сердечного ритма. Электрический сенсор пульса. Сенсор кислорода в крови. Два сенсора температуры. | Использование двух сенсоров температуры, один из которых находится на задней панели, а другой под дисплеем позволяет измерять температуру наиболее точно. Измерение температуры используется, чтобы отвечать за отклонения от нормы, вызванные чрезмерной нагрузкой, нарушением сна или болезнью. Кроме того, измерение температуры используется для прогнозирования овуляции и месячных у женщин. Более мощные гироскоп и акселерометр, а также продвинутый алгоритм позволили создать функцию обнаружения аварии. Помимо датчиков движения, алгоритм использует информацию от барометра, GPS и микрофона. |

Важнейшей функцией, которая может быть включена в новые поколения Apple Watch, является неинвазивное измерение уровня сахара в крови [120]. Сенсоры, способные осуществлять данный замер, уже существуют [121]. Измерение уровня сахара в крови имеет очевидные медицинские применения — оно крайне важно для больных диабетом, а также представляет значительный интерес и для более широкой аудитории, так как позволяет лучше контролировать питание для пользователей, занимающихся спортом или пытающихся похудеть.

Важнейшим поставщиком технологических решений в сфере лазерных сенсоров для Apple является британская компания Rockley Photonics. В рамках подготовки выхода на биржу в 2021 году Rockley Photonics сообщила в финансовых документах, что ее основным клиентом в течение многих лет

была Apple. В рамках сделки SPAC капитализация Rockley Photonics составила 1,2 млрд долларов. В пресс-релизе, выпущенном 20 января, Rockley Photonics заявила, что ее клиентская база включает 17 ведущих мировых производителей бытовой электроники и медицинского оборудования [122].

Анализ эволюции основных продуктов Apple как лидера мирового рынка потребительской носимой электроники позволяет нам выделить ряд тенденций, характерных для данного рынка в настоящее время.

ПРИОРИТЕТНОЕ РАЗВИТИЕ ФУНКЦИЙ, СВЯЗАННЫХ СО ЗДОРОВЬЕМ

Здравоохранение представляет собой гигантский и растущий рынок. Apple предпринимает существенные усилия, чтобы расширить свое присутствие на этом рынке. В 2019 году генеральный директор компании Apple Тим Кук заявил: «Я думаю, что придет день, когда люди, оглядываясь назад, скажут, что самый большой вклад Apple в мир был связан со здоровьем» [123]. Эндрю Рикман, глава Rockley Photonics — важнейшего производителя сенсоров для Apple, в 2021 году заявил: «Мы верим, что перенос лабораторной диагностики на запястье изменит мониторинг пациентов, оказание медицинской помощи в общее здоровье и благополучие потребителей». В докладе, опубликованном в июле 2022 года, Apple представил свою концепцию развития сервисов, связанных со здоровьем, в которой Apple Watch занимает ключевое место как «интегральный компаньон для здоровья и фитнеса».

РАСШИРЕНИЯ КЛИЕНТСКОЙ БАЗЫ ЗА СЧЕТ БОЛЕЕ ВОЗРАСТНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Демографические изменения, выражающиеся в старении населения и связанным с ним увеличением распространения хронических заболеваний, а также увеличении в населении доли пожилых людей, требующих ухода, создают бизнес-возможности для компаний, производящих потре-

бительскую электронику. Первоначально ядром пользователей носимой электроники были молодые люди, не испытывающие серьезных проблем со здоровьем, активно занимающиеся спортом. Однако с появлением таких функций, как построение электрокардиограммы, детектор падения и SOS-сигнал, Apple Watch расширили свою аудиторию. Приложение Health позволяет делиться любой информацией, хранящейся в данном приложении. Пользователи могут получать важные уведомления о здоровье близких и просматривать информацию, такую как активность и частоту сердечных сокращений. Использование функции Family Setup позволяет сопрягать несколько часов с только одним iPhone. Эта функция может использоваться родителями для своих детей, но, кроме того, взрослые дети могут использовать ее, чтобы добавлять своих стареющих родителей в свои учетные записи. Таким образом, Apple Watch могут использоваться для ухода за пожилыми, в том числе находящимися в состоянии деменции.

ДОБАВЛЕНИЕ НОВЫХ ФУНКЦИЙ В УЖЕ СУЩЕСТВУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Появление новых технологических возможностей, связанное с разработкой новых моделей сенсоров, не приводит к появлению принципиально новых продуктов, вместо этого новые функции интегрируются в существующие продукты, прежде всего умные часы. Есть основание считать, что данная тенденция продолжится. Наличие лояльности клиентской базы, мощь бренда Apple, интеграция с другими продуктами Apple приводят к тому, что даже в случае появления новых продуктов, разработанных конкурентами, Apple сохраняет долю рынка за счет включения новой функции в следующее поколение устройств. Крупнейший конкурент Apple — компания Samsung — действует на рынке таким же образом. Другие компании, как правило, стремятся концентрироваться на отдельных сегментах рынка. Это свидетельствует о зрелости рынка потребительской носимой электроники, наличие на этом рынке устоявшихся игроков.

РОЛЬ АЛГОРИТМОВ НЕ МЕНЕЕ ВАЖНА, ЧЕМ РОЛЬ СЕНСОРОВ

Появление целого ряда новых функций, таких как детектор падения и детектор аварии, опиралось не на использование принципиально новых сенсоров, а на использование алгоритмов, комбинирующих информацию от сенсоров, доступных в более ранних поколениях устройств, таких как гироскоп и акселерометр.

ИНТЕГРАЦИЯ УСТРОЙСТВ НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И СИСТЕМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ВРАЧАМИ

Большой объем данных о здоровье, собираемых устройствами носимой электроники, бесполезен, если эти данные не трансформируются в более глубокое понимание состояния здоровья пользователя и не становятся руководством к действию. Лидеры рынка потребительской электроники стремятся разработать решения, которые бы позволили предоставлять рекомендации как самим пользователям, так и помогать врачам в принятии решения о стратегии лечения. Apple стремится выстроить «мост» между устройствами пациента и медицинскими записями, которые просматривают врачи. В то же время исследования, подтверждающие пользу для здоровья от мониторинга этих типов данных, остаются ограниченными.

SAMSUNG

Важнейшим конкурентом Apple на рынке носимой электроники является компания Samsung. Доля Samsung среди всех устройств носимой электроники, поставляемых на мировой рынок, составляет 9%, при этом его доля на рынке умных наушников составляет 7%, а умных часов — 9%. Продукты Samsung включают умные наушники (Galaxy Buds series) и умные часы (Galaxy Watch). Как и устройства Apple, наушники от Samsung сохранили свой базовый функционал, в то время как умные часы последовательно приобретают новые функции при появлении новых поколе-

ний продукта. Развитие Galaxy Watch следовало в значительной степени параллельно Apple Watch, используемые сенсоры и доступные функции совпадают с умными часами от Apple (таблица 5).

Таблица 5. Эволюция Galaxy Watch

| Поколение продукта | Дата выпуска | Сенсоры |
|--|---------------------|---|
| Samsung Galaxy Watch | 24 августа 2018 г. | Акселерометр. Гироскоп. Барометр. Электрооптический сенсор (для контроля сердечного ритма). Фотодетектор (для рассеянного света). |
| Samsung Galaxy Watch 3 | 6 августа 2020 г. | Акселерометр. Гироскоп. Барометр. Электрооптический сенсор (для контроля сердечного ритма). Фотодетектор (для рассеянного света). Электрический сенсор сердечного ритма (ЭКГ). |
| Samsung Galaxy Watch 4 Galaxy Watch 4 Classic | 27 августа 2021 г. | Акселерометр. Гироскоп. Барометр. Электрооптический сенсор (для контроля сердечного ритма). Фотодетектор (для рассеянного света). Электрический сенсор сердечного ритма (ЭКГ). Геоманитный сенсор. |
| Samsung Galaxy Watch 5 Galaxy Watch 5 Pro | 26 августа 2022 г. | Акселерометр. Гироскоп. Барометр. Электрооптический сенсор (для контроля сердечного ритма). Фотодетектор (для рассеянного света). Электрический сенсор сердечного ритма (ЭКГ). Геоманитный сенсор. Сенсор температуры. |

XIAOMI

Компания Xiaomi занимает 10,2% среди всех устройств носимой электроники, поставляемых на мировой рынок. Xiaomi — один из лидеров рынка фитнес-браслетов, однако этот рынок растет заметно медленнее, чем рынок умных часов. Компания производит семейство умных браслетов Mi Band. Первая модель серии была выпущена 22 июля 2014 года. Последняя на настоящее время модель (Xiaomi Smart Band 7 Pro, выпущена 4 июля 2022 г.) использует следующие сенсоры: акселерометр, гироскоп, барометр, сенсор сердечного ритма, сенсор уровня кислорода в крови.

Xiaomi приняла решение отказаться от бренда Mi в пользу бренда Xiaomi, развивая параллельно два суббренда: премиальный Xiaomi и бюджетный Redmi. Еще одним суббрендом, развивающимся обособленно от Xiaomi, является Poco. Каждый из суббрендов разработал свою линейку умных часов.

Poco Watch были выпущены 26 апреля 2022 года. Часы включают как стандартные акселерометр, гироскоп и сенсор сердечного ритма, так и сенсор уровня кислорода в крови, который редко встречается в относительно дешевых продуктах. Redmi Watch — это бюджетная линейка, включающая только базовые функции. Наконец, линейка Xiaomi Watch представляет собой премиальный сегмент и нацелена на конкуренцию с ведущими моделями других компаний, она включает сенсор сердечного ритма, сенсор кислорода в крови, акселерометр, гироскоп, геомагнитный датчик, барометр, датчик внешней освещенности.

HUAWEI И HONOR

Из крупнейших производителей мобильных устройств Huawei последний зашел на рынок умных часов (таблица 6). Последние модели (Watch 3 и Watch GT 3) располагают функцией круглосуточного отслеживания

SpO2 (уровня кислорода в крови), но в отличие от флагманских моделей конкурентов не включают измерение ЭКГ.

Таблица 6. Модели умных часов от компании Huawei

| Модель | Дата выпуска | Сенсоры |
|--------------|------------------|--|
| Watch GT 1 | Ноябрь 2018 г. | Акселерометр. Гироскоп. Магнитометр. Оптический датчик сердечного ритма. Датчик освещенности. Барометр. |
| Watch GT 2 | Сентябрь 2019 г. | Акселерометр. Гироскоп. Геоманнитный датчик. Оптический датчик сердечного ритма. Датчик освещенности. Барометр. Емкостный датчик. |
| Watch GT 3 | Ноябрь 2021 г. | Акселерометр. Гироскоп. Геоманнитный датчик. Оптический датчик сердечного ритма. Барометр. Датчик температуры. Сенсор отслеживания уровня кислорода в крови. |
| Huawei Watch | Сентябрь 2015 г. | Акселерометр. Гироскоп. Магнитометр. Оптический датчик сердечного ритма. Датчик освещенности. Емкостный датчик. |

| Модель | Дата выпуска | Сенсоры |
|----------------|---------------------|--|
| Huawei Watch 2 | Апрель 2017 г. | Акселерометр. Гироскоп. Геомагнитный датчик. Оптический датчик сердечного ритма. Датчик освещенности. Барометр. Емкостный датчик. |
| Huawei Watch 3 | Июнь 2021 г. | Акселерометр. Гироскоп. Геомагнитный датчик. Оптический датчик сердечного ритма. Барометр. Сенсор температуры. Сенсор внешнего освещения. Сенсор отслеживания уровня кислорода в крови. |

Honor, действующий как независимый бренд с 2020 года, выпускает линейку умных часов Magic Watch (таблица 7). Первая модель (Magic Watch 1) была выпущена 29 января 2019 года. Часы включали акселерометр, гироскоп, барометр и сенсор сердечного ритма. Последующие модели дополнительно получили сенсор температуры и сенсор кислорода в крови.

Таблица 7. Модели умных часов от компании Honor

| Модель | Дата выпуска | Сенсоры |
|---------------|--------------------|--|
| Magic Watch 1 | 29 января 2019 г. | Акселерометр. Гироскоп. Оптический сенсор сердечного ритма. Сенсор внешнего освещения. Барометр. |
| Magic Watch 2 | 20 декабря 2019 г. | Акселерометр. Гироскоп. Датчик магнитометра. Оптический сенсор сердечного ритма. Сенсор внешнего освещения. Барометр. |
| Magic Watch 3 | 12 августа 2021 г. | Акселерометр. Гироскоп. Сенсор внешнего освещения. Оптический сенсор сердечного ритма. Сенсор уровня кислорода в крови. Сенсор температуры. |

GOOGLE

В январе 2021 года Google завершил сделку по покупке Fitbit — первопроходца рынка носимой электроники, чья доля в 2014 году составляла 37,9% всех отгруженных устройств. Несмотря на то, что Fitbit по-прежнему ассоциируется главным образом с фитнес-браслетами, компания также производит и умные часы. Последняя на настоящее время модель фитнес-браслета (Fitbit Inspire 3) была выпущена 15 сентября 2022 года, ее главной особенностью является сенсор насыщения крови кислородом, который обычно не встречается в относительно дешевых фитнес-браслетах. Последняя на настоящее время модель умных часов (Fitbit Sense 2) выходит 23 сентября 2022 года. Модель будет включать сенсор cEDA, который осуществляет непрерывное сканирование кожи в сочетании с

оптическим датчиком сердечного ритма, цель алгоритма в отслеживании напряжения и стресса. Метрика cEDA будет еще одним способом измерения стресса, который использует Sense 2, помимо используемого в Sense 1 EDA (выборочного сканирования кожи).

Умные часы Google Pixel Watch выходят в октябре 2022 года, они будут работать под управлением Wear OS и включать такие функции FitBit, как отслеживание сна, мониторинг сердечного ритма и другие возможности отслеживания физической активности.

GARMIN

Американская компания Garmin была основана в 1989 году как производитель GPS-навигаторов. Garmin до сих пор производит в том числе навигационное оборудование, но важной частью бизнеса компании являются фитнес-браслеты и умные часы. Garmin занимает относительно небольшую долю в общем объеме произведенных умных часов, однако его доля в выручке на этом рынке составляет заметные 9,4%, что объясняется тем, что компания занимает премиальный сегмент.

Часы Garmin включают множество моделей, разработанных специально для различных видов спорта и содержащих различные наборы функций. Все версии Garmin могут отслеживать частоту сердечных сокращений, шаги и сожженные калории. Некоторые из моделей Garmin рассчитывают насыщение крови кислородом. В отличие от последних моделей Apple Watch, Garmin не рассчитывают показания ЭКГ.

OURA

Компания Oura была создана в Финляндии, ее продуктом является умное кольцо, отслеживающее показатели физической активности. Oura первого поколения была создана в 2015 году после кампании на Kicksarter, второе поколение вышло в 2018 году, а третье — в 2021-м. Oura дороже конкурентов (физическое устройство стоит €314, месячная подписка составляет €5,99 в месяц), однако ее преимуществами является высокая точность измерения. Ряд функций появился у Oura раньше, чем у других производителей носимой электроники. Так, Oura 3 поколения, доступная с 16 ноября 2021 года, включает датчик температуры, появившийся в продуктах Samsung и Apple только в конце лета и начале осени 2022 года. Oura использует фотоплетизмографический сенсор (фотосенсор) для измерения пульса и частоты дыхания, датчик температуры, 3-осевой акселерометр, сенсор уровня кислорода в крови.

WHOOP

Whoop — это стартап, получивший инвестиции в размере более 405 миллионов долларов. Среди инвесторов компании присутствуют Thursday Ventures and SoftBank Vision Fund. Продуктом Whoop является фитнес-браслет, ориентированный на профессиональных спортсменов. Его главное предназначение заключается в оптимизации тренировок и восстановления. Whoop 1.0 был выпущен в 2015 году, вторая версия вышла в 2016-м, третья — в 2019-м, а четвертая — в 2021-м. Два главных показателя, которые измеряет Whoop, — это нагрузка (strain) и восстановление (recovery). Используемые сенсоры включают фотоплетизмографический сенсор (фотосенсор) для измерения пульса и производных параметров (в частности, вариабельности сердечного ритма (HRV), датчик температуры, 3-осевой акселерометр для отслеживания покоя и активности, емкостной датчик для определения того, что устройство касается телом, сенсор кислорода в крови.

С точки зрения дизайна важнейшей особенностью Whoop является отсутствие экрана — вся информация отражается в приложении на телефоне. По умолчанию Whoop носится на запястье как обычный фитнес-браслет, однако он может крепиться на разных участках тела с помощью специально разработанной спортивной одежды (бюстгальтеры, компрессионные топы, леггинсы, боксеры или шорты). Узкая специализация Whoop позволяет упростить понимание данных пользователем и способствовать эффективному использованию этих данных. Whoop предоставляет информацию о том, насколько тяжело тело перенесло тренировку и насколько оно готово к тренировочным нагрузкам в наступившем дне. Таким образом, Whoop помогает принимать решения по поводу времени проведения тренировок и их интенсивности.

Бизнес-модель Whoop отличается от других компаний в области носимой электроники тем, что компания продает не физическое устройство, а сервис, который оплачивается с помощью абонентской платы (подписки), что позволяет снизить порог входа для новых пользователей. Месячная подписка составляет 18–30 долларов, за эту цену пользователи получают носимое устройство и доступ к аналитике данных. Модель Whoop уже оказала влияние на рынок потребительской носимой электроники: несмотря на то, что другие компании не отказались от взимания платы за физическое устройство, некоторые из них экспериментируют с подписной моделью. Fitbit запустила подписку Fitbit Premium в 2019 году, Oura предоставила платный доступ к дополнительным функциям за € 5,99 в месяц, Halo от Amazon сопровождается подпиской на 3,99 доллара в месяц.

Анализ конкурентной среды на рынке потребительской носимой электроники позволяет нам сделать ряд выводов. Во-первых, важнейшим продуктом на рынке являются умные часы. Компании, обладающие выраженными конкурентными преимуществами на других сегментах рынка носимой электроники (например, Xiaomi и Fitbit/Google на рынке фитнес-

нес-браслетов), тем не менее стремятся развивать свои модели умных часов, соответствующие по функционалу лидерам рынка (прежде всего Apple и Samsung). Исключением являются лишь компании, осознанно ориентирующиеся на отдельные рыночные ниши (Whoop и Oura). Во-вторых, внедрение технологических инноваций идет параллельно для всех важнейших компаний на рынке. Технологические и маркетинговые инновации нередко внедряются первыми нишевыми продуктами (например, сенсоры Oura или модель подписки Whoop), однако быстро подхватываются лидерами рынка.

5. НОСИМАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ЗДОРОВЬЯ: АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ

Несмотря на то, что потребительная носимая электроника является быстро развивающимся рынком, многочисленные продукты, созданные компаниями, действующими на этом рынке, безусловно являются коммерчески успешными, применимость и эффективность данных продуктов для укрепления здоровья не является очевидной. В данном разделе мы рассмотрим научную литературу, посвященную применимости и эффективности устройств потребительской носимой электроники, сконцентрировавшись на трех ключевых аспектах:

1. В какой мере измерения, производимые устройствами потребительской носимой электроники, являются достоверными и могут быть использованы при принятии медицинских решений?
2. Оказывает ли ношение трекеров и получение доступа к информации на поведение потребителей, связанное со здоровьем? Иными словами, помогает ли наличие фитнес-трекеров пользователям вести более здоровый образ жизни?
3. В какой мере данные, собираемые устройствами потребительской носимой электроники, могут быть успешно использованы врачами?

ВАЛИДНОСТЬ ОЦЕНОК МОНИТОРИНГА ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ КОММЕРЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.

Существуют многочисленные исследования, посвященные достоверности измерения уровня физической активности при помощи устройств

носимой электроники. Для того, чтобы обобщить их результаты, ученые прибегают к проведению систематических обзоров — научных исследований, представляющих собой обзор опубликованных работ в рамках четко сформулированного исследовательского вопроса и с использованием разработанного протокола, обеспечивающего прозрачные критерии включения и исключения публикаций. Систематические обзоры позволяют достоверно агрегировать большое количество результатов, полученных в литературе. Систематические обзоры могут как включать, так и не включать статистический метаанализ — обобщение результатов нескольких исследований методами статистики.

Качество измерений устройствами носимой электроники может быть классифицировано с помощью критериев валидности и надежности. Под валидностью понимают способность устройств точно измерять то, что они должны измерять (количество шагов, расстояние, расход энергии и т. п.). Для этого показания устройств носимой электроники сопоставляются с определенным «золотым стандартом», используемым для расчета того же самого показателя. Например, испытуемый может считать количество сделанных шагов, а затем сопоставлять полученное число с показаниями устройства. Под надежностью понимают способность устройств выдавать устойчивые показания: результаты повторного испытания дают те же самые данные (Intradvice Reliability) — это может быть проверено в лабораторных условиях; измерения с помощью разных устройств дают быстрые результаты.

Исследования, посвященные валидности и надежности измерений устройств носимой электроники, могут проводиться в лаборатории или в условиях, максимально приближенных к тому, как они используются пользователями в реальности (Free-living Context). Важно понимать, что лабораторных исследований недостаточно, использование устройств носимой электроники в реальной жизни существенно отличается от их использо-

вания в лаборатории. Если в лаборатории измерения, как правило, производятся при ограниченном количестве видов физической активности (как правило, бег и ходьба) и ограниченном диапазоне интенсивности (высокая и низкая интенсивность), то в реальной жизни потребители участвуют в большом количестве разнообразных активностей (например, уборка дома, игра в теннис или катание на самокате) с различной интенсивностью. По мере того, как устройства носимой электроники все активнее используются для контроля физической активности не только молодых и физически активных пользователей, но и пожилых и низкомобильных групп населения, возрастает значимость точности измерения энергетической затратности бытовых активностей, таких как передвижение внутри дома, уборка и тому подобное. Результаты исследований, посвященных оценке валидности и надежности измерений уровня физической активности с помощью устройств носимой электроники, представлены в таблице 8.

Таблица 8. Результаты исследований, посвященных точности измерения физической активности устройствами носимой электроники

| | |
|------------------|--|
| Количество шагов | Измерения количества шагов достаточно точны [124, 125, 126, 127], в том числе в условиях реальной жизни [128], для спортивных целей [129] при использовании пожилыми [130]. Количество шагов в контролируемых тестах недооценивается, а в условиях реальной жизни переоценивается [131]. Существуют значительные отличия в показателях количества шагов, измеренных с помощью различных устройств [126]. |
| Расстояние | Измерения расстояния достаточно точны [126], но недостаточны для использования устройств в спортивных целях [129]. Трекеры завышают оценку расстояния на низких скоростях и занижают на более высоких [124]. |
| Расход энергии | Расход энергии недооценивается [124, 126, 132]. |

| | |
|----------------------|--|
| Сердечные сокращения | Популярные коммерческие продукты (в частности, Apple Watch) имеют хорошую достоверность измерения максимальной частоты сердечных сокращений без существенного занижения или завышения [126, 133]. Устройства, носимые на запястьях, занижают частоту сердечных сокращений, особенно в случае высокой интенсивности, а также если упражнение включает активные движения руками [132]. |
|----------------------|--|

В 2015 году был осуществлен систематический обзор, включающий 22 исследования, посвященные достоверности надежности трекеров физической активности Fitbit и Jawbone, их способности оценивать шаги, расстояние и расход энергии [124]. Было показано, что в лабораторных исследованиях как Fitbit, так и Jawbone достаточно точно измеряли количество шагов. Лишь одно из исследований показало, что Fitbit завышает оценку расстояния на более низких скоростях и занижает на более высоких. Используя несколько различных мер сравнения (косвенная и прямая калориметрия, акселерометрия, самоотчет), было показано, что расход энергии, как правило, недооценивался трекерами. Таким образом, систематический обзор показал более высокую достоверность шагов и физическую активность и более низкую достоверность расхода энергии.

Обзор 67 исследований, проведенный в 2018 году, показал, что устройства Fitbit обеспечивали приемлемую точность подсчета шагов примерно в половине случаев с тенденцией недооценивать шаги в контролируемых тестах и переоценивать шаги в условиях свободной жизни [131]. Данные нескольких исследований также показали, что, по сравнению с акселерометрами исследовательского уровня, устройства Fitbit могут обеспечивать аналогичные измерения времени, проведенного в постели, и времени сна, при этом, вероятно, заметно переоценивая время, затрачиваемое на высокоинтенсивные действия, и недооценивая расстояние при быстром передвижении.

В еще одном систематическом обзоре, проведенном в 2018 году [132], проводилась попытка обобщить последние результаты исследований наиболее популярных на рынке носимых устройств для получения биометрической информации, связанной с шагами, частотой сердечных сокращений и расходом калорий. Для обзора было отобрано 10 статей: авторы обзора пришли к выводу, что носимые устройства имеют тенденцию к занижению расхода энергии по сравнению с лабораторными показателями. Все устройства, носимые на запястьях, занижали частоту сердечных сокращений, и эта ошибка увеличивалась при увеличении интенсивности упражнений, а также была выше для тех упражнений, которые включали активные движения руками. Измерение частоты сердечных сокращений также, как правило, было лучше в покое и при выполнении упражнений на велоэргометре по сравнению с упражнениями на беговой дорожке или эллиптическом тренажере. Оценки точности измерения максимальной частоты сердечных сокращений показывают, что популярные коммерческие продукты (в частности, Apple Watch) имеют хорошую достоверность измерения максимальной частоты сердечных сокращений, без существенного занижения или завышения оценки [133].

В систематическом обзоре, проведенном в 2020 году и включавшем 158 публикаций, посвященных девяти различным торговым маркам носимых устройств, было показано, что в лабораторных условиях Fitbit, Apple Watch и Samsung достаточно точно измеряли количество шагов [125]. Измерение частоты сердечных сокращений было менее надежным: Apple Watch и Garmin были точны, а Fitbit имел тенденцию к занижению. В измерении расхода энергии ни один бренд не был достаточно точным.

Отдельным вопросом является валидность оценок качества сна коммерчески доступных устройств носимой электроники. Сопоставление показателей Basis Health Tracker, Misfit Shine, Fitbit Flex, Withings Pulse O2 и Actiwatch Spectrum с показателями полисомнографии, которая счита-

ется «золотым стандартом» мониторинга сна, показывают, что для всех устройств не было выявлено сильной корреляции общего времени сна с полисомнографией [134]. Эффективность сна отличалась от полисомнографии для Withings, Misfit, Fitbit и Basis, но не отличалась для Actiwatch.

Сопоставимость показателей различных фитнес-трекеров исследовалась в работе, в которой каждому из 44 участников исследования было предложено одновременно носить 6 устройств (Apple Watch 2, Samsung Gear S3, Jawbone Up3, Fitbit Surge, Huawei Talk Band B3 и Xiaomi Mi Band 2) и 2 приложения для смартфонов (Dongdong и Ledongli) для измерения пяти основных показателей здоровья (частота сердечных сокращений, количество шагов, расстояние, потребление энергии и продолжительность сна) в различных состояниях активности (отдых, ходьба, бег, езда на велосипеде и сон), которые затем сравнивались с «золотым стандартом» [126]. Результаты свидетельствуют, что носимые устройства имели довольно высокую точность измерения частоты сердечных сокращений, количества шагов, расстояния и продолжительности сна, в то время как низкая точность измерения наблюдалась для потребления энергии (калорий). Измерения одного и того же показателя, измеряемого разными фитнес-трекерами, различались. Различия в измерении количества шагов были самыми высокими, тогда как они были самыми низкими для частоты сердечных сокращений. Измерения одного и того же показателя, измеренного при разных состояниях активности, различались незначительно.

Оценка уровня физической активности требует от носимых устройств с достаточной точностью определять тип деятельности (лежание, сидение, ходьба и бег различной интенсивности). На выборке из 49 участников (23 мужчины и 26 женщин), которые использовали Apple Watch Series 2, Fitbit Charge HR2 и iPhone 6S и выполнили 65-минутный протокол, состоящий из 40 минут общего времени беговой дорожки и 25 минут времени сидения или лежания, было показано, что данные коммерческих

носимых устройств могут предсказывать типы движений с достаточной точностью [135].

Проблемой использования данных устройств носимой электроники является большая неоднородность между моделями отслеживания активности и точности записанных данных. Тем не менее устройства носимой электроники представляют собой ценный источник данных о физической активности для эпидемиологических исследований, и существуют успешные примеры использования данных устройств потребительской электроники для такого рода исследований. Так, на основе автоматической регистрации данных о физической активности пользователей, использующих трекеры от Apple, Fitbit, Garmin, Oura, Polar, Samsung и Withings, было показано, что по сравнению с мартом 2019 года в период карантина в марте 2020 года произошло значительное сокращение среднего количества шагов и среднего расхода энергии на активность. Сокращение количества шагов и расхода энергии при активности было временным, и следующие ежемесячные сравнения не показали существенных изменений между 2019 и 2020 годами: март-декабрь 2019 года с мартом-декабрем 2020 года [136]. Таким образом, различия между показаниями различных устройств могут быть преодолены.

Суммируя, можно ответить, что за время существования коммерческих устройств носимой электроники в исследовательской литературе накоплен большой объем результатов, посвященных точности измерений, осуществляемых этими устройствами. В целом исследователи делают вывод о достаточно высокой точности измерения физической активности. В большинстве случаев устройства обеспечивают достаточно точные измерения для нужд пользователей, особенно это касается изменения числа сделанных шагов. В то же время существуют и устойчивые погрешности измерения. Лабораторные исследования показывают, что устройства носимой электроники характеризуются хорошей валидностью, однако ис-

пользование потребительских продуктов в более реалистичной среде существенно отличается, поэтому необходимо исследование валидности оценок устройств потребительской носимой электроники за пределами лаборатории. В ситуации свободного поведения потребителей, смешивающих активности различного уровня интенсивности, включая сидячие, точность оценивания уровня физической активности оказывается заметно ниже, чем в проводимых тестах [137]. Однако именно такое поведение точнее отражает повседневную деятельность пользователей носимой электроники. Еще одним недостаточно исследованным вопросом остается применимость методов мониторинга мобильности для пожилых и лиц с ограниченной подвижностью [138, 139].

ВЛИЯНИЕ УСТРОЙСТВ НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ПОВЕДЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, СВЯЗАННОЕ СО ЗДОРОВЬЕМ

В какой мере устройства носимой электроники помогают пользователям вести более здоровый образ жизни? На этот вопрос способны ответить экспериментальные исследования, в рамках которых участники эксперимента разделяются на две группы: группу воздействия, которая получает в свое распоряжение устройства носимой электроники, и группу контроля, которая находится в тех же условиях, что и группа воздействия, но не получает в распоряжение устройств носимой электроники. Распределение между группой воздействия и группой контроля происходит случайным образом. Такого рода исследования позволяют оценить влияние устройств носимой электроники на различные исходы, связанные со здоровьем (таблица 9), такие как: уровень физической активности (измеренный как среднее число пройденных шагов в течение дня, расстояние или уровень потраченной энергии); объективные показатели, связанные со здоровьем, например индекс массы тела, дающий возможность судить о наличии или отсутствии ожирения, а также ее степени, а также кровяное давление; субъективные показатели психологического благополучия.

Таблица 9. Влияние носимой электроники на факторы здоровья

| | |
|---|---|
| Уровень физической активности | Увеличение времени, затрачиваемого на ходьбу, сокращение времени, проводимого сидя [140]. Увеличение физической активности, измеренной как количество шагов, на 26,9% [141]. |
| Индекс массы тела (ИМТ), окружность талии | Сокращение ИМТ на 0,38 (Bravata et al., 2007). Значимое сокращение ИМТ и окружности талии [142]. |
| Кровяное давление | Снижение систолического артериального давления снизилось на 3,8 мм рт. ст. [141]. |
| Субъективное благополучие | Улучшение общего самочувствия на рабочем месте [143]. |

Экспериментальные исследования свидетельствуют, что использование устройств носимой электроники меняет поведение пользователей, заставляя их больше двигаться. Так, исследование, в рамках которого участникам бесплатно были предоставлены коммерчески доступные носимые трекеры активности (Garmin Vivofit4) и настраиваемая панель электронного здравоохранения, показало существенное увеличение физической активности в течение первых 8 недель экспериментального вмешательства [140]. Среднее время, затраченное на ходьбу через 8 недель, было значительно выше по сравнению с исходным уровнем, без существенных различий для других результатов физической активности. По сравнению с исходным уровнем среднее время, проведенное сидя, было значительно ниже через 4 недели и 8 недель. Социальная поддержка в результате участия в программе нескольких членов одного домохозяйства мотивировала изменения в физической активности. Участники испытали улучшение своего психического, физического и социального здоровья. Метааналитическое исследование, включающее 18 рандоми-

зированных контрольных испытаний, показало, что использование носимых устройств и приложений для смартфонов приводило к небольшому или умеренному увеличению физической активности в минутах в день и умеренному увеличению ежедневного количества шагов [144]. Обзор 12 экспериментальных исследований показал, что использование носимой электроники связано с умеренным кратковременным увеличением физической активности [145]. Экспериментальные исследования, включенные в обзор, проведенный Братава с соавторами, свидетельствуют, что пользователи шагомеров увеличили свою физическую активность на 2491 шаг в день больше, чем участники контрольной группы [141]. Обсервационные исследования, включенные в этот же обзор, показали увеличение уровня физической активности на 2183 шага в день по сравнению с исходным уровнем. В целом пользователи шагомеров увеличили свою физическую активность на 26,9% по сравнению с исходным уровнем.

Насколько устойчивым являются изменения в поведении пользователей, вызванные использованием устройств носимой электроники, не вполне ясно, однако исследовательская литература свидетельствует, что эти изменения поведения приводят к положительным изменениям объективных показателей физического здоровья, таких как индекс массы тела. Систематический обзор влияния шагомеров на физическую активность показал, что использование устройств носимой электроники связано со статистически значимым снижением индекса массы тела и артериального давления, хотя авторы оговариваются: являются ли эти изменения устойчивыми в долгосрочной перспективе — неизвестно [141]. Пользователи шагомеров снизили свой индекс массы тела на 0,38, их систолическое артериальное давление снизилось на 3,8 мм рт. ст.

Метаанализ 19 рандомизированных контролируемых испытаний показал, что носимые технологии в качестве вмешательства в физическую активность обеспечивают умеренный и значительный эффект на массу тела

и окружность талии, а также большой и значительный эффект на индекс массы тела [142]. Анализ подгрупп подтвердил, что носимые технологии более эффективны для контроля веса у людей с ожирением и хроническими заболеваниями. Продолжительность использования носимых технологий в сумме более или равная 12 неделям была более эффективной. Другое обзорное исследование показало, что цифровой самоконтроль был связан с потерей веса в 74% случаев [146]. Таким образом, носимые медицинские устройства являются эффективными инструментами/стратегиями вмешательства для снижения массы тела и ИМТ у людей с избыточным весом/ожирением и хроническими сопутствующими заболеваниями [147].

Чтобы максимизировать выгоды от использования устройств носимой электроники, необходимо понимать, от чего зависят возникающие эффекты, какие именно поведенческие паттерны их вызывают. Важнейшим предиктором повышения физической активности является наличие поставленной цели, например 10 000 шагов в день [141]. Поведенческие паттерны, благодаря которым устройства носимой электроники оказываются эффективными, тесно связаны с механизмами обратной связи, которые они создают. Поведение пользователей фитнес-трекеров включает техники определенных в социальной когнитивной теории как потенциально эффективные: самоконтроль и обратная связь, целеполагание и сравнение между текущим и целевым поведением, социальная поддержка и социальное сравнение [148]. Несмотря на то, что носимые устройства могут способствовать изменению поведения в отношении здоровья, это изменение может быть вызвано этими устройствами не само по себе. Вместо этого успешное использование и потенциальная польза для здоровья, связанная с этими устройствами, больше зависят от разработки стратегий взаимодействия, чем от особенностей их технологии. В конечном счете это стратегии вовлечения — комбинация индивидуального поощрения,

социальная конкуренция и сотрудничество, а также эффективная обратная связь, которые связаны с человеческим поведением [149].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВРАЧАМИ ДАННЫХ, СОБИРАЕМЫХ УСТРОЙСТВАМИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

По мере интеграции в устройства носимой электроники все большего количества функций, связанных с отслеживанием медицинских показателей, все большую актуальность приобретает их использование в рамках системы поддержки хронических больных. Устройства носимой электроники позволяют осуществлять постоянный мониторинг состояния здоровья в режиме реального времени, что важно для самостоятельного контроля больных за своим состоянием (self-management). Кроме того, устройства носимой электроники способны предоставить беспрецедентный объем данных о здоровье для использования врачами.

Однако для внедрения устройств носимой электроники в существующие модели здравоохранения потребуются убедительные эмпирические данные, подтверждающие эффективность данных устройств в отношении результатов здравоохранения, детально разработанные рекомендации по внедрению и использованию. Эмпирические исследования эффективности использования носимых устройств в здравоохранении в настоящее время находятся в зачаточном состоянии, при этом большая часть исследований использует наблюдательный дизайн и небольшие размеры выборки. Существует лишь минимум синтезированных данных о влиянии носимых устройств на результаты лечения людей с хроническими заболеваниями.

В описательном систематическом обзоре, опубликованном в 2022 году, были рассмотрены данные 30 рандомизированных и наблюдательных исследований, опубликованных в период с 1 января 2016 г. по 1 июля 2021 г. [150]. Наибольшее количество исследований было посвящено диа-

бету 2 типа, болезни Паркинсона и хронической боли в пояснице. Результаты обзора были неоднозначными: 50% (15/30) исследований обнаружили положительное влияние на изучаемый результат, а 50% (15/30) продемонстрировали нулевой эффект. Эта гетерогенность результатов может объясняться большим спектром хронических заболеваний, включенных в обзор, разнообразием исследуемых исходов, связанных со здоровьем, и разнообразием используемых устройств.

Несмотря на достаточную точность измерений, потребительские устройства носимой электроники, за редким исключением (например, Apple Watch Series 6), не имеют разрешения на медицинское использование, и таким образом не могут использоваться в процессе принятия клинических решений. Тем не менее они способны приносить улучшение индексов качества жизни больных, что может быть связано с большей самостоятельностью (self-efficacy) больных в контроле за состоянием собственного здоровья [151].

Носимые устройства позволяют осуществлять мониторинг дистанционно, что потенциально способно позволить существенно снизить издержки здравоохранения. Так, исследование с участием пациентов с имплантированными сердечными дефибрилляторами обнаружило, что удаленный мониторинг с помощью устройства носимой электроники позволяет снизить медицинские расходы на мониторинг на 25% [152].

Успешное использование устройств носимой электроники в системе здравоохранения требует решения множества проблем, связанных как с регулированием контроля за безопасностью данных, так и выявлением и внедрением лучших практик использования данных устройств. В 2021-м два центра передового опыта Национального института здравоохранения США по работе с большими данными организовали семинар по потенциальным клиническим применениям носимых устройств [153]. Рабочая

группа включала представителей управления больницами клинической медицины (ученых, представителей страховых компаний и индустрии коммерческих устройств). Были определены семь факторов успешного внедрения носимых устройств, в том числе: четко определенная проблема, интеграция в систему оказания медицинской помощи, технологическая поддержка, персонализированный опыт, ориентация на опыт конечного пользователя, соответствие моделям возмещения расходов и привлечение высококвалифицированных клиницистов.

Объем усилий по внедрению мобильных устройств в систему здравоохранения отражает тот факт, что гранты Национального института здравоохранения США на «мобильное здоровье» выросли с десятков в год до более 610 в 2019 году [154]. Мероприятия объединения mHealth Connect акцентировали значимость междисциплинарного сотрудничества, подчеркивая, что важно уделять внимание цели и учитывать факторы, выходящие за рамки самой технологии. Производимые объединением документы предназначены для того, чтобы служить руководством для продвижения мобильного здравоохранения и освещать способы, с помощью которых можно ускорить прогресс по интеграции данных устройств носимой электроники в систему здравоохранения.

Таким образом, роль носимых устройств в улучшении результатов лечения хронических заболеваний не является однозначно определенной. Требуются дополнительные исследования, чтобы установить связь между носимыми устройствами и результатами медицинской помощи для людей с хроническими заболеваниями. Кроме того, помимо формирования условий для широкого внедрения носимых устройств в медицинских учреждениях, необходимо решить проблемы согласования с регулирующими органами, связанные с конфиденциальностью данных и точностью программного обеспечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для создания основы повышения самостоятельности, агентности и благополучия мы видим необходимость в получении объективной оценки персонального здоровья, для получения которой могут быть использованы носимые и имплантированные устройства. Носимая электроника обладает огромным потенциалом в области генерирования больших данных, а также широко применима в биомедицине и для самостоятельного контроля здоровья. По этой причине исследователи переключают свое внимание со сбора данных на разработку алгоритмов, способных извлекать ценную информацию из собранных данных, используя методы интеллектуального анализа данных, такие как статистическая классификация и нейронные сети. Носимые технологии могут собрать биометрические данные и предоставить ценную информацию для здравоохранения и самостоятельного поддержания хорошего самочувствия.

Рассмотренные в данном томе три уровня технологий носимых датчиков предоставляют возможности распознавания и анализа данных для принятия оптимальных решений. Носимые сенсоры — это интегрированные аналитические устройства, которые позволяют осуществлять непрерывный мониторинг биометрических показателей человека неинвазивным или минимально инвазивным способом и обнаруживать даже незначительные физиологические изменения с течением времени, обеспечивая альтернативный путь к клинической диагностике. Если говорить о возможности научных разработок, то можно выделить следующие направления исследований:

1. Создание устройств для медицинского или частично медицинского использования на основе мультимодальных сенсорных систем с лонгитюдным сбором больших данных, позволяющих самостоятельно и

быстро получить физиологические данные. Это могут быть как пользователи устройства, так и медицинские организации. Данные могут этически собираться и обрабатываться вне зависимости от географического положения пациента, что снизит нагрузку на поликлиники и персонал при правильном внедрении. Такой подход может быть применен как для улучшения общего самочувствия, профилактики, так и для реабилитации. Такие системы для медицинских учреждений потребуют обязательные протоколы сертификации, которые тоже должны быть разработаны и протестированы в институтах, курирующих профильные технологии. В дальнейшем возможно создание инфраструктурных решений на базе машинного обучения и развитие единой экосистемы цифрового здоровья, страхования и доставки лекарств, что согласуется с государственной стратегией цифровой трансформации отрасли «Здравоохранения» до 2024 года и на плановый период до 2030 года [28].

2. Мы предполагаем, что использование неинвазивных сенсоров, скорости получения, обработки данных, алгоритмов и рекомендаций будет расти и затрагивать не только лечение и диагностику, но и на первый план будут выходить протоколы предотвращения заболеваний, гормональных и медиаторных нарушений. Все это поможет не только быть здоровым и самостоятельным, но и чувствовать себя лучше, реализовываться в мире, иметь качественную, интересную, здоровую и долгую жизнь. Для этого требуются лонгитюдные нейрофизиологические нейрогуморальные исследования с применением сенсоров всех доступных поколений, генетических анализов, инноваций в области искусственного интеллекта и других возможных технологий. Также требуется разработка пула превентивных и ранних

диагностических подходов, ориентированных на предотвращение и профилактику ментальных заболеваний. Основой для этого будет проведение крупномасштабных когортных исследований с использованием носимых датчиков для подтверждения их клинической применимости для диагностики и исследований на уровне популяции.

3. Продолжение исследований в области фронтир-технологий: в будущем расширение возможностей носимых устройств за пределы диагностического зондирования за счет интеграции петель обратной связи проложит путь к носимым устройствам третьего поколения. Оптимальным решением будет слияние диагностики и лечения. Примерами подобного слияния могут быть следующие технологии: мониторинг заживления ран посредством измерения pH в режиме реального времени; в случае заражения — лечение путем высвобождения по требованию антибиотиков или противовоспалительных препаратов; расширение возможностей носимых систем непрерывного мониторинга глюкозы для высвобождения оптимальной дозы инсулина. Все эти подходы требуют пула теоретических и прикладных исследований.

Несомненно, интерес представляет и научное решение технических инфраструктурных сложностей, например проблемы автономного питания, передачи, кодирования, обработки данных. Эти исследования могут привести к развитию автономных, носимых биодатчиков. Новые фронтир-подходы к биораспознаванию и анализу могут применяться для повышения чувствительности сенсоров и пролонгирования времени их использования.

Таким образом, благодаря все более широкому использованию носимых устройств и инновациям все доступнее будет становиться оператив-

ная, точная и своевременная медицинская помощь. Важно понимать, что не только развитие технологий биосенсоров, но и интеграция носимых устройств с приложениями, разработка протоколов безопасности обработки данных (например, блокчейн), создание этической нормативно-правовой базы для передачи и хранения данных, социальная популяризация решений — все это вместе позволит создать основу для самостоятельного укрепления здоровья человека и практического применения достижений цифровой трансформации.

Суммируя проведенный обзор о применимости устройств носимой электроники для укрепления здоровья, мы сможем сделать следующие выводы:

1. Несмотря на существующие проблемы с точностью измерений трекерами показателей физической активности, можно сделать вывод, что в большинстве случаев устройства обеспечивают достаточно точные измерения, достаточные для нужд пользователей. Тем не менее необходимо продолжение исследований и дальнейшие усилия исследователей и представителей индустрии коммерческих устройств по увеличению точности измерений. Недостаточно исследований в лабораторных исследованиях, важно определить, как устройства используются в реальной жизни пользователями с разными потребностями и разным состоянием здоровья.
2. Исследовательская литература свидетельствует о наличии устойчивых положительных результатов использования устройств носимой электроники на поведение, связанное со здоровьем. Наиболее убедительны свидетельства об увеличении уровня физической активности у использующих устройства носимой электроники по сравнению с теми, кто их не использует, хотя необходимы дополнительные

исследования с более длительным временным горизонтом, чтобы понять, насколько данные изменения поведения являются устойчивыми. Положительное влияние устройств носимой электроники на отдельные объективные показатели физического здоровья (прежде всего, индекс массы тела) также можно считать установленным. Необходимо большее число исследований, направленных на оценку влияния носимых устройств на другие объективные показатели, в частности артериальное давление. Наконец, недостаточно исследованным является влияние носимых устройств на субъективные показатели качества жизни, такие как удовлетворенность жизнью и психологическое благополучие.

3. Эффективность внедрения носимых устройств в медицинскую практику остается под вопросом. Очевидной сферой применения трекеров является самоконтроль хронических заболеваний. Участие пациентов в самоконтроле хронических заболеваний является важным компонентом моделей оказания медицинской помощи при хронических заболеваниях. Носимые устройства предоставляют данные о состоянии здоровья пациента в режиме реального времени, что может помочь в принятии решений по самоконтролю. Однако, несмотря на предполагаемые преимущества носимых устройств в улучшении самоконтроля хронических заболеваний, их влияние на результаты лечения остается плохо изученным. Необходимы как создание условий для такого вмешательства (решение нормативных сложностей, разработка методических материалов для врачей, обеспечение совместимости данных носимых устройств и систем, используемых врачами), так и экспериментальные исследования влияния использования данных носимых устройств врачами при лечении. Существу-

ющие исследования дают неоднозначные результаты: отдельные работы свидетельствуют о наличии положительного эффекта на исходы, связанные со здоровьем, другие исследования такого эффекта не обнаруживают.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digital health. URL: https://www.who.int/health-topics/digital-health#tab=tab_1 (дата обращения: 10.10.2022).
2. Digital health (электронный ресурс). URL: https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA71/A71_R7-en.pdf (дата обращения: 10.10.2022).
3. Digital Health Market. URL: <https://www.precedenceresearch.com/digital-health-market> (дата обращения: 14.10.2022).
4. Wearable technology in health care: Getting better all the time. URL: <https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/2022/wearable-technology-healthcare.html> (дата обращения: 14.10.2022).
5. Aroganam G., Manivannan N., Harrison D. Review on Wearable Technology Sensors Used in Consumer Sport Applications // Sensors, 2019. — № 9 (19). — P. 1983.
6. Wearable technology in health care: Getting better all the time // Deloitte Insights [Электронный ресурс]. URL: <https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/2022/wearable-technology-healthcare.html> (дата обращения: 31.07.2022).
7. Wearable technology in health care: Getting better all the time // Deloitte Insights [Электронный ресурс]. URL: <https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/2022/wearable-technology-healthcare.html> (дата обращения: 31.07.2022).
8. Formica D., Schena E. Smart Sensors for Healthcare and Medical Applications // Sensors (Basel, Switzerland), 2021. — № 2 (21). — P. 543.
9. Connected living in a wearable world | The Wearable Life 2.0 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pwc.com/ee/et/publications/pub/pwc-cis-wearables.pdf> (дата обращения: 07.08.2022).

10. Bariya M., Nyein H. Y. Y., Javey A. Wearable sweat sensors // Nature Electronics. 2018. № 3 (1). P. 160–171.
11. Microcontrollers (MCU) Selection Guide: Types, Features, Applications | Engineering360 [Электронный ресурс]. URL: https://www-globalspec-com.translate.goog/learnmore/semiconductors/microprocessors_microcontrollers/microcontrollers?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=op,wapp (дата обращения: 01.08.2022).
12. Glucose Sensors Market Players, Size, Share, Report, Value, Definition, & Global Analysis By 2029 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-glucose-sensors-market> (дата обращения: 01.08.2022).
13. Wearable Sensors Market Analysis, Insights, Scope, Size,& Trends [Электронный ресурс]. URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-wearable-sensors-market> (дата обращения: 01.08.2022).
14. A Noninvasive Wearable Device for Real-Time Monitoring of Secretion Sweat Pressure by Digital Display: iScience [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(20\)30850-6](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(20)30850-6) (дата обращения: 01.08.2022).
15. Home // Neurotech, LLC ® [Электронный ресурс]. URL: <https://www.neurotecheeg.com/> (дата обращения: 01.08.2022).
16. Palla A. [и др.]. Wearable speech enhancement system based on MEMS microphone array for disabled people, 2015. — P. 1–5.
17. Lee S. [и др.]. An ultrathin conformable vibration-responsive electronic skin for quantitative vocal recognition // Nature Communications, 2019. — № 1 (10). — P. 2468.
18. Biosensors | Free Full-Text | The Current State of Optical Sensors in Medical Wearables | HTML [Электронный ресурс]. URL: https://www-mdpi-com.translate.goog/2079_6374/12/4/217/htm?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=op,wapp (дата обращения: 01.08.2022).

19. Konstantinidis D. [и др.]. Wearable blood pressure measurement devices and new approaches in hypertension management: the digital era // *Journal of Human Hypertension*, — 2022. — P. 1–7.
20. McCarthy M., Grey M. Motion Sensor Use for Physical Activity Data: Methodological Considerations // *Nursing research*, — 2015. — № 4 (64). — P. 320–327.
21. Yang C.–C., Hsu Y.–L. A Review of Accelerometry–Based Wearable Motion Detectors for Physical Activity Monitoring // *Sensors*, — 2010. — № 8 (10). — P. 7772–7788.
22. Morillo D. S. [и др.]. An Accelerometer–Based Device for Sleep Apnea Screening // *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2010. — № 2 (14). — P. 491–499.
23. Mukhopadhyay S. C. Wearable Sensors for Human Activity Monitoring: A Review // *Sensors Journal, IEEE*, 2015. — (15). — P. 1321–1330.
24. Arakawa T. Recent Research and Developing Trends of Wearable Sensors for Detecting Blood Pressure // *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018. — № 9 (18). — P. 2772.
25. Cuevas–González D. [и др.]. System for Continuous and Prolonged Ambulatory ECG Monitoring with Hosting and Visualization on the Cloud // *Engineering Proceedings*, 2021. — № 1 (10). — P. 57.
26. Haghi M., Thurow K., Stoll R. Wearable Devices in Medical Internet of Things: Scientific Research and Commercially Available Devices // *Healthcare Informatics Research*, 2017. — № 1 (23). — P. 4–15.
27. Ledford H., Callaway E. Pioneers of revolutionary CRISPR gene editing win chemistry Nobel // *Nature*, 2020. — № 7829 (586). — P. 346–347.
28. CRISPR–based strategies in infectious disease diagnosis and therapy | SpringerLink [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s15010-020-01554-w> (дата обращения: 12.08.2022).
29. Otsuka And Proteus® Announce The First U.S. FDA Approval of A Digital

- Medicine System: ABILIFY MYCITE® (aripiprazole tablets with sensor) | Discover Otsuka [Электронный ресурс]. URL: https://www-otsuka-us-com.translate.google/discover/articles-1075?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=op,wapp (дата обращения: 31.07.2022).
30. Глюкокортикоиды вызывают инсулинорезистентность всего организма с изменениями сердечного метаболизма | Американский журнал физиологии–эндокринологии и метаболизма [Электронный ресурс]. URL: https://journals-physiology-org.translate.google/doi/full/10.1152/ajpendo.00453.2006?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=wapp (дата обращения: 31.07.2022).
31. App for a better life. Control your Parkinson disease [Электронный ресурс]. URL: https://cupd.mobi/index_en.html (дата обращения: 01.08.2022).
32. Fox K. et al. Heart rate as a prognostic risk factor in patients with coronary artery disease and left-ventricular systolic dysfunction (BEAUTIFUL): a subgroup analysis of a randomised controlled trial // The Lancet. Elsevier, 2008. — Vol. 372. — № 9641. — P. 817–821.
33. Bayoumy K. [и др.]. Smart wearable devices in cardiovascular care: where we are and how to move forward // Nature Reviews Cardiology, 2021. — № 8 (18). — P. 581–599.
34. Kamišalić A. et al. Sensors and Functionalities of Non-Invasive Wrist-Wearable Devices: A Review: 6 // Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018. Vol. 18, № 6. P. 1714.
35. Perez M.V. et al. Large-Scale Assessment of a Smartwatch to Identify Atrial Fibrillation // New England Journal of Medicine. Massachusetts Medical Society, 2019. — Vol. 381. — № 20. — P. 1909–1917.
36. Sharma A. [и др.]. Advancements and future prospects of wearable sensing technology for healthcare applications // Sensors & Diagnostics, 2022. — № 3 (1). — P. 387–404. An J. E. [и др.]. Wearable Cortisol Aptasensor for Simple and Rapid Real-Time Monitoring // ACS Sensors, 2022. — № 1 (7). — P. 99–108.

37. Jung M. H. [и др.]. Wrist-wearable bioelectrical impedance analyzer with miniature electrodes for daily obesity management // *Scientific Reports*, 2021. — № 1 (11). — P. 1238.
38. Анализатор состава тела (жироанализатор) Omron BF-306 [Электронный ресурс]. URL: <https://omron-rus.ru/omron-bf-306.html> (дата обращения: 10.08.2022).
39. Naranjo D., Reina-Tosina J., Min M. Fundamentals, Recent Advances, and Future Challenges in Bioimpedance Devices for Healthcare Applications // *Journal of Sensors*, 2019. — P. 1–42.
40. Naranjo-Hernández D. [и др.]. Smart Bioimpedance Spectroscopy Device for Body Composition Estimation // *Sensors*, 2020. — № 1 (20). — P. 70.
41. «Лаборатория на чипе»: сверхчувствительный микродатчик для медицинских анализов [Электронный ресурс]. URL: <https://misis.ru/university/news/science/2022-06/7998/> (дата обращения: 31.07.2022).
42. Biometrics // Wikipedia. 2022.
43. LeBoeuf S. F. [и др.]. Earbud-Based Sensor for the Assessment of Energy Expenditure, Heart Rate, and VO₂max // *Medicine and science in sports and exercise*, 2014. — № 5 (46). — P. 1046–1052.
44. Leppänen T. [и др.]. Editorial: Machine Learning and Wearable Technology in Sleep Medicine // *Frontiers in Digital Health*, 2022 (4).
45. Oura Ring: Accurate Health Information Accessible to Everyone // Oura Ring [Электронный ресурс]. URL: <https://ouraring.com> (дата обращения: 01.08.2022).
46. PULSSIR — удаленный мониторинг физического состояния человека [Электронный ресурс]. URL: <https://pulssir.com/ru> (дата обращения: 01.08.2022).
47. Ahmadzadeh S., Luo J., Wiffen R. Review on Biomedical Sensors, Technologies and Algorithms for Diagnosis of Sleep Disordered Breathing: Comprehensive Survey // *IEEE reviews in biomedical engineering*, 2022 —

- (15). — P. 4–22.
48. Liu J. [и др.]. Wearable Device Heart Rate and Activity Data in an Unsupervised Approach to Personalized Sleep Monitoring: Algorithm Validation // JMIR mHealth and uHealth, 2020. — № 8 (8). — P. e18370.
49. Diabetes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes> (дата обращения: 09.08.2022).
50. Life [Электронный ресурс]. URL: https://www.mdpi.com/journal/life/special_issues/Hormone_Dependent_Cancers (дата обращения: 09.08.2022).
51. Toniolo A. [и др.]. The diabetes pandemic and associated infections: Suggestions for clinical microbiology // Reviews in Medical Microbiology, 2018. — (30). — P. 1.
52. JCM | Free Full-Text | How to Measure Intraocular Pressure: An Updated Review of Various Tonometers | HTML [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0383/10/17/3860/htm> (дата обращения: 31.07.2022).
53. Wentholt I. M. E. [и др.]. Pendra goes Dutch: lessons for the CE mark in Europe // Diabetologia, 2005. — № 6 (48). — P. 1055–1058.
54. Sensors | Free Full-Text | Carbon Nanotube Wearable Sensors for Health Diagnostics | HTML [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/17/5847/htm> (дата обращения: 01.08.2022).
55. Einarson T.R. et al. Prevalence of cardiovascular disease in type 2 diabetes: a systematic literature review of scientific evidence from across the world in 2007–2017 // Cardiovascular Diabetology, 2018. — Vol. 17. — № 1. P. 83.
56. Akalestou E., Genser L., Rutter G. A. Glucocorticoid Metabolism in Obesity and Following Weight Loss // Frontiers in Endocrinology. 2020. — (11).
57. Bauerle K. T., Harris C. Glucocorticoids and Diabetes // Missouri Medicine, 2016. — № 5 (113). — P. 378–383.
58. Smartwatch data can predict blood test results, new Stanford study

- reports | Stanford Healthcare Innovation Lab [Электронный ресурс]. URL: <https://innovations.stanford.edu/new-publication/smartwatch-data-can-predict-blood-test-results-new-stanford-study-reports/> (дата обращения: 31.07.2022).
59. Intelligence I. Here are the top health tech companies and startups developing wearable medical devices in 2022 // Insider Intelligence [Электронный ресурс]. URL: <https://www.insiderintelligence.com/insights/wearable-tech-companies-startups/> (дата обращения: 31.07.2022).
60. Khan M. S. [и др.]. MEMS Sensors for Diagnostics and Treatment in the Fight against COVID-19 and Other Pandemics // IEEE Access, 2021. — (9). — P. 61123–61149.
61. Vijayan V. [и др.]. Review of Wearable Devices and Data Collection Considerations for Connected Health // Sensors, 2021. — № 16 (21). — P. 5589.
62. Carp O. E., Pinteala M., Arvinte A. Innovative Non-Enzymatic Electrochemical Quantification of Cholesterol // Sensors, 2022. — № 3 (22). — P. 828.
63. Koukouvinos G. [и др.]. Simultaneous determination of CRP and D-dimer in human blood plasma samples with White Light Reflectance Spectroscopy // Biosensors and Bioelectronics, 2016. — (84). — P. 89–96.
64. Zhang D., Wang W., Li F. Association between resting heart rate and coronary artery disease, stroke, sudden death and noncardiovascular diseases: a meta-analysis // CMAJ. CMAJ, 2016. Vol. 188, № 15. P. E384–E392.
65. McCombie D.B., Reisner A.T., Asada H.H. Adaptive blood pressure estimation from wearable PPG sensors using peripheral artery pulse wave velocity measurements and multi-channel blind identification of local arterial dynamics // 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. — P. 3521–3524.
66. Angelopoulou M., Kakabakos S., Petrou P. Label-Free Biosensors Based onto Monolithically Integrated onto Silicon Optical Transducers //

- Chemosensors, 2018. — (6). — P. 52.
67. De Marchi B. [и др.]. Blood Pressure Continuous Measurement through a Wearable Device: Development and Validation of a Cuffless Method // Sensors (Basel, Switzerland), 2021. — № 21 (21). — P. 7334.
68. Frontiers | Past, Present, and Future of Multisensory Wearable Technology to Monitor Sleep and Circadian Rhythms [Электронный ресурс]. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fdgth.2021.721919/full> (дата обращения: 31.07.2022).
69. Sensors | Free Full-Text | Optical Biosensors for Label-Free Detection of Small Molecules | HTML [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4126/htm> (дата обращения: 31.07.2022).
70. Park J. [и др.]. Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review // Frontiers in Physiology, 2022. — (12).
71. Lazazzera R., Belhaj Y., Carrault G. A New Wearable Device for Blood Pressure Estimation Using Photoplethysmogram: 11 // Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019. — Vol. 19. — № 11. P. — 2557.
72. Will wearables ever accurately measure blood pressure? // Medical Device Network [Электронный ресурс]. URL: https://medical-technology.nridigital.com/medical_technology_jul21/wearables_measure_blood_pressure (дата обращения: 31.07.2022).
73. For Cutting-Edge Innovations, the US Pulls Ahead of the EU in Medtech Regulation // BCG Global [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bcg.com/publications/2022/us-ahead-in-medtech-regulation> (дата обращения: 01.08.2022).
74. Sensors | Free Full-Text | The Progress of Glucose Monitoring—A Review of Invasive to Minimally and Non-Invasive Techniques, Devices and Sensors | HTML [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/4/800/htm> (дата обращения: 31.07.2022).
75. Graphene Electronic Tattoo Sensors | ACS Nano [Электронный ресурс].

- URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.7b02182> (дата обращения: 01.08.2022).
76. Kireev D. [и др.]. Graphene electronic tattoos 2.0 with enhanced performance, breathability and robustness // *npj 2D Materials and Applications*, 2022. — (6). — P. 46.
 77. Seshadri D. R. [и др.]. Wearable Sensors for COVID–19: A Call to Action to Harness Our Digital Infrastructure for Remote Patient Monitoring and Virtual Assessments // *Frontiers in Digital Health*, 2020. — (2).
 78. Muse — Meditation Made Easy // Muse [Электронный ресурс]. URL: <https://choosemuse.com/> (дата обращения: 09.08.2022).
 79. Krigolson O. E. [и др.]. Using Muse: Rapid Mobile Assessment of Brain Performance // *Frontiers in Neuroscience*, — 2021. — (15).
 80. Gootenberg J. S. [и др.]. Multiplexed and portable nucleic acid detection platform with Cas13, Cas12a, and Csm6 // *Science*, 2018. — № 6387 (360). — P. 439–444.
 81. CRISPR–Cas12a target binding unleashes indiscriminate single–stranded DNase activity [Электронный ресурс]. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aar6245> (дата обращения: 01.08.2022).
 82. Jamil N. [и др.]. Noninvasive Electroencephalography Equipment for Assistive, Adaptive, and Rehabilitative Brain–Computer Interfaces: A Systematic Literature Review // *Sensors*, 2021. — № 14 (21). — P. 4754.
 83. Команда SberDevices запатентовала первые разработки в области носимых магнитометров — СберБанк [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sberbank.com/ru/news-and-media/press-releases/article?newsID=b592635f-1092-4e48-a329-f5b9bdf5c371&blockID=7®ionID=77&lang=ru&type=NEWS> (дата обращения: 09.08.2022).
 84. Multiplexed and portable nucleic acid detection platform with Cas13, Cas12a, and Csm6 [Электронный ресурс]. URL: https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aag0179?casa_token=5SMGluOer24AAAAA%3A-928xi9_RBdYnSipJcxAWl2EicRkPpqN933YR6IA1hml6-6uGOROE

- 9_8kSUXDL26WleUjWQwzlih8Q (дата обращения: 01.08.2022).
85. Loke G. [и др.]. Digital electronics in fibres enable fabric-based machine-learning inference // Nature Communications, 2021. — № 1 (12). — P. 3317.
 86. Газпромбанк инвестирует в стартап по исследованию мозга с помощью квантовых сенсоров — Техника на vc.ru // vc.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://vc.ru/tech/453275-gazprombank-investiruet-v-startap-po-issledovaniyu-mozga-s-pomoshchyu-kvantovyh-sensorov> (дата обращения: 01.08.2022).
 87. 1. 11.11.2021 // AIJ // Будущее магнитометрии. Александра Бернадотт, Сбер; Юлия Сандамирская, Intel // 2021.
 88. About — zimmerandpeacock [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zimmerpeacocktech.com/about-1/> (дата обращения: 31.07.2022).
 89. Rodrigues D. [и др.]. Skin-Integrated Wearable Systems and Implantable Biosensors: A Comprehensive Review // Biosensors, 2020. — № 7 (10). — P. 79.
 90. Reduced Graphene Oxide Tattoo as Wearable Proximity Sensor Kedambaimoole, 2021, Advanced Electronic Materials, Wiley Online Library [Электронный ресурс]. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aelm.202001214> (дата обращения: 01.08.2022).
 91. MATRIX: Self-Powered Solutions // MATRIX: Self-Powered Solutions [Электронный ресурс]. URL: <https://www.matrixindustries.com> (дата обращения: 01.08.2022).
 92. Fitbit Official Site for Activity Trackers and More [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fitbit.com/global/eu/home> (дата обращения: 31.07.2022).
 93. (PDF) Noninvasive intracranial pressure monitoring methods: A critical review [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/352594915_Noninvasive_intracranial_pressure_monitoring_methods_A_critical_review (дата обращения: 31.07.2022).

94. Home | Z-Works [Электронный ресурс]. URL: <https://www.z-works.co.jp/?lang=en> (дата обращения: 31.07.2022).
95. Wearables, Covid-19 and the Health-Tech Revolution | Institute for Global Change [Электронный ресурс]. URL: <https://institute.global/policy/wearables-covid-19-and-health-tech-revolution> (дата обращения: 31.07.2022).
96. Zhang J. [и др.]. In-depth proteomic analysis of tissue interstitial fluid for hepatocellular carcinoma serum biomarker discovery // *British Journal of Cancer*, 2017. — № 11 (117). — P. 1676–1684.
97. Integrated Devices for Non-Invasive Diagnostics — Ates — 2021 — Advanced Functional Materials — Wiley Online Library [Электронный ресурс]. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adfm.202010388> (дата обращения: 12.08.2022).
98. Xu J., Fang Y., Chen J. Wearable Biosensors for Non-Invasive Sweat Diagnostics // *Biosensors*, 2021. — № 8 (11). — P. 245.
99. Nguyen P. Q. [и др.]. Wearable materials with embedded synthetic biology sensors for biomolecule detection // *Nature Biotechnology*, 2021. — № 11 (39). — P. 1366–1374.
100. Tasić N., Paixão T. R. L. C., Gonçalves L. M. Biosensing of D-dimer, making the transition from the central hospital laboratory to bedside determination // *Talanta*, 2020. — (207). — P. 120–270.
101. Д-диметр — Диакон [Электронный ресурс]. URL: [https://www.diakonlab.ru/files/%D0%94-%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%80%20%D0%91%D1%83%D0%BA%D0%BB%D0%B5%D1%82%200117%20\(mail\).pdf](https://www.diakonlab.ru/files/%D0%94-%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%80%20%D0%91%D1%83%D0%BA%D0%BB%D0%B5%D1%82%200117%20(mail).pdf) (дата обращения: 09.08.2022).
102. Kourtis L. [и др.]. Digital biomarkers for Alzheimer’s disease: the mobile/wearable devices opportunity // *npj Digital Medicine*, 2019. — (2).
103. End-to-end design of wearable sensors | *Nature Reviews Materials* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41578-022-00460-x> (дата обращения: 31.07.2022).

104. Гутенева Наталия. Разработка методов иммунохроматографической детекции малых молекул с использованием магнитных наномаркеров // МФТИ, 2019. — P. 119.
105. Nanomaterials | Free Full-Text | Evolution of Wearable Devices with Real-Time Disease Monitoring for Personalized Healthcare | HTML [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2079-4991/9/6/813/html> (дата обращения: 31.07.2022).
106. Ndabakuranye J. P., Praver S., Ahnood A. A System-on-Chip Assay for Bilirubin Levels Measurement in Whole Blood // Engineering Proceedings, 2021. — № 1 (10). — P. 74.
107. Soltermann F., Struwe W. B., Kukura P. Label-free methods for optical in vitro characterization of protein-protein interactions // Physical Chemistry Chemical Physics, 2021. — № 31 (23). — P. 16488–16500.
108. Belugina R. [и др.]. Developing non-invasive bladder cancer screening methodology through potentiometric multisensor urine analysis // Talanta, 2021. — (234). — P. 122–696.
109. Jovin I. New sweat sensor measures cortisol levels to detect stress // Gadgets & Wearables [Электронный ресурс]. URL: <https://gadgetsandwearables.com/2022/02/08/sweat-sensor-cortisol/> (дата обращения: 01.08.2022).
110. Glucocorticoids produce whole body insulin resistance with changes in cardiac metabolism // American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism.
111. Investigation of Cortisol Dynamics in Human Sweat Using a Graphene-Based Wireless mHealth System — ScienceDirect [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590238520300217> (дата обращения: 07.08.2022).
112. Battery-free, tuning circuit-inspired wireless sensor systems for detection of multiple biomarkers in bodily fluids | Science Advances [Электронный ресурс]. URL: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.abo7049> (дата обращения: 07.08.2022).

113. Wearable Technology Market Analysis By Product, By Application And Segment Forecasts From 2015 To 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.millioninsights.com/industry-reports/wearable-technology-market#:~:text=The%20global%20wearable%20technology%20market,USD%2018.0%20billion%20in%202014.> (дата обращения: 01.09.2022).
114. Wearable electronics market [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/wearable-electronics-market-983.html>. (дата обращения: 01.09.2022).
115. Wearables unit sales share worldwide from 2019 to 2020, by category [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/statistics/538159/share-of-global-wearables-sales-by-category/#:~:text=In%202020%2C%20earwear%20accounted%20for,of%20wearable%20unit%20sales%20worldwide.> (дата обращения: 01.09.2022).
116. Global Smartwatch Market Revenue up 20% in H1 2020, Led by Apple, Garmin & Huawei [Электронный ресурс]. URL: <https://www.counterpointresearch.com/global-smartwatch-market-revenue-h1-2020/> (дата обращения: 10.09.2022).
117. Apple Studying Potential of AirPods as Health Device [Электронный ресурс]. URL: https://www.wsj.com/articles/apple-studying-potential-of-airpods-as-health-device-11634122800?mod=djemalertNEWS%20%D0%B8%20https://www.engadget.com/apple-airpods-health-device-leak-132037664.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xILmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAEQxKWbV85_K9fZndZWBXMYrIUztt7hajOvzwnPE1SX7ZvFBk2oe-C5M2cdeYdt-OXY16CpkuQSnLP5-%20Mptf7MyDdIGKOrTTOBSASRcH5wmBKkXBd9DIa6IXWPpfSaD_brs0ib27odAmsVpgRMBg4IMBNdOCu3RAowva7U Vc_lq3 (дата обращения: 10.09.2022).
118. Apple Supplier Rockley Photonics Unveils Health Tracking Tech Likely to Come to Apple Watch [Электронный ресурс]. URL: <https://www.macrumors.com/2021/07/14/apple-supplier-unveils-health-tracking->

- tech/ (дата обращения: 12.09.2022).
119. Live glucose monitoring with the apple watch [Электронный ресурс]. URL: <https://hackaday.com/2022/06/06/live-glucose-monitoring-with-the-apple-watch/> (дата обращения: 26.08.2022).
120. Rockley Photonics is developing a wearable to track blood sugar [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fastcompany.com/90730050/apple-partner-rockley-photonics-blood-sugar> (дата обращения: 04.09.2022).
121. Rockley Photonics Reaches Key Milestone in the Development of Cuffless, Non-Invasive Blood Pressure Measurement on the Wrist, Potentially Enabling a New Measurement Technique for Cardiovascular Health [Электронный ресурс]. URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20220120005414/en/Rockley-Photonics-Reaches-Key-Milestone-in-the-Development-of-Cuffless-Non-Invasive-Blood-Pressure-Measurement-on-the-Wrist-Potentially-Enabling-a-New-Measurement-Technique-for-Cardiovascular-Health> (дата обращения: 13.09.2022).
122. Tim Cook: Apple's greatest contribution will be 'about health' [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cnbc.com/2019/01/08/tim-cook-teases-new-apple-services-tied-to-health-care.html> (дата обращения: 13.09.2022).
123. Evenson, K. R., Goto, M. M., & Furberg, R. D. (2015). Systematic review of the validity and reliability of consumer-wearable activity trackers. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. — 12 (1). — P. 1–22.
124. Fuller, D., Colwell, E., Low, J., Orychock, K., Tobin, M. A., Simango, B., Buote, R., Van Heerden, D., Luan, H., & Cullen, K. Reliability and validity of commercially available wearable devices for measuring steps, energy expenditure, and heart rate: Systematic review. *JMIR MHealth and UHealth*, 2020. — 8 (9). — e18694.
125. Xie, J., Wen, D., Liang, L., Jia, Y., Gao, L., & Lei, J. (2018). Evaluating the Validity of Current Mainstream Wearable Devices in Fitness Tracking Under

- Various Physical Activities: Comparative Study. JMIR MHealth and UHealth, 6 (4), e9754. <https://doi.org/10.2196/mhealth.9754>
126. Dominick, G. M., Winfree, K. N., Pohlig, R. T., & Papas, M. A. Physical activity assessment between consumer–and research–grade accelerometers: A comparative study in free–living conditions. JMIR MHealth and UHealth, 2016. — 4 (3). — e6281.
127. Gomersall, S. R., Ng, N., Burton, N. W., Pavey, T. G., Gilson, N. D., & Brown, W. J. Estimating physical activity and sedentary behavior in a free–living context: A pragmatic comparison of consumer–based activity trackers and ActiGraph accelerometry. Journal of Medical Internet Research, 2016. — 18 (9). — e5531.
128. Wahl, Y., Düking, P., Droszez, A., Wahl, P., & Mester, J. Criterion–validity of commercially available physical activity tracker to estimate step count, covered distance and energy expenditure during sports conditions. Frontiers in Physiology, 2017. — 8. — 725.
129. Straiton, N., Alharbi, M., Bauman, A., Neubeck, L., Gullick, J., Bhindi, R., & Gallagher, R. The validity and reliability of consumer–grade activity trackers in older, community–dwelling adults: A systematic review. Maturitas, 2018. — 112. — P. 85–93.
130. Feehan, L. M., Geldman, J., Sayre, E. C., Park, C., Ezzat, A. M., Yoo, J. Y., Hamilton, C. B., & Li, L. C. Accuracy of Fitbit Devices: Systematic Review and Narrative Syntheses of Quantitative Data. JMIR MHealth and UHealth, 2018. — 6 (8). — e10527. — <https://doi.org/10.2196/10527>
131. Bunn, J. A., Navalta, J. W., Fountaine, C. J., & Reece, J. D. Current state of commercial wearable technology in physical activity monitoring 2015–2017. International Journal of Exercise Science, 2018. — 11 (7). — P. 503.
132. Abt, G., Bray, J., & Benson, A. C. The validity and inter–device variability of the Apple Watch™ for measuring maximal heart rate. Journal of Sports Sciences, 2018. — 36 (13). — P. 1447–1452.
133. Mantua, J., Gravel, N., & Spencer, R. M. C. Reliability of Sleep Measures

- from Four Personal Health Monitoring Devices Compared to Research-Based Actigraphy and Polysomnography. *Sensors*, 2016. — 16 (5). — 646. — <https://doi.org/10.3390/s16050646>
134. Fuller, D., Anaraki, J. R., Simango, B., Rayner, M., Dorani, F., Bozorgi, A., Luan, H., & Basset, F. A. Predicting lying, sitting, walking and running using Apple Watch and Fitbit data. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 2021. — 7 (1). — e001004.
135. Henriksen, A., Johannessen, E., Hartvigsen, G., Grimsgaard, S., & Hopstock, L. A. Consumer-based activity trackers as a tool for physical activity monitoring in epidemiological studies during the COVID-19 pandemic: Development and usability study. *JMIR Public Health and Surveillance*, 2021. — 7 (4). — e23806.
136. Bai, Y., Hibbing, P., Mantis, C., & Welk, G. J. Comparative evaluation of heart rate-based monitors: Apple Watch vs Fitbit Charge HR. *Journal of Sports Sciences*, 2018. — 36 (15). — P. 1734–1741. — <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1412235>
137. De Bruin, E. D., Hartmann, A., Uebelhart, D., Murer, K., & Zijlstra, W. Wearable systems for monitoring mobility-related activities in older people: A systematic review. *Clinical Rehabilitation*, 2008. — 22 (10–11). — P. 878–895.
138. Kekade, S., Hsieh, C.-H., Islam, M. M., Atique, S., Khalfan, A. M., Li, Y.-C., & Abdul, S. S. The usefulness and actual use of wearable devices among the elderly population. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2018. — 153. P. — 137–159.
139. McCormack, G. R., Petersen, J., Ghoneim, D., Blackstaffe, A., Naish, C., & Doyle-Baker, P. K. Effectiveness of an 8-Week Physical Activity Intervention Involving Wearable Activity Trackers and an eHealth App: Mixed Methods Study. *JMIR Formative Research*, 2022. — 6 (5). — e37348.
140. Bravata, D. M., Smith-Spangler, C., Sundaram, V., Gienger, A. L., Lin, N., Lewis, R., Stave, C. D., Olkin, I., & Sirard, J. R. Using pedometers to

- increase physical activity and improve health: A systematic review. *Jama*, 2007. — 298 (19). — P. 2296–2304.
141. Yen, H.–Y., & Chiu, H.–L. The effectiveness of wearable technologies as physical activity interventions in weight control: A systematic review and meta–analysis of randomized controlled trials. *Obesity Reviews*, 2019. — 20 (10). — P. 1485–1493.
142. Zeng, N., & Gao, Z. Health wearable devices and physical activity promotion. *Technology in Physical Activity and Health Promotion*, 2017. — P. — 148–164.
143. Gal, R., May, A. M., van Overmeeren, E. J., Simons, M., & Monninkhof, E. M. The effect of physical activity interventions comprising wearables and smartphone applications on physical activity: A systematic review and meta–analysis. *Sports Medicine–Open*, 2018. — 4 (1). — P. 1–15.
144. Tang, M. S. S., Moore, K., McGavigan, A., Clark, R. A., & Ganesan, A. N. Effectiveness of wearable trackers on physical activity in healthy adults: Systematic review and meta–analysis of randomized controlled trials. *JMIR MHealth and UHealth*, 2020. — 8 (7). — e15576.
145. Patel, M. L., Wakayama, L. N., & Bennett, G. G. Self–monitoring via digital health in weight loss interventions: A systematic review among adults with overweight or obesity. *Obesity*, 2021. — 29 (3). — P. 478–499.
146. McDonough, D. J., Su, X., & Gao, Z. Health wearable devices for weight and BMI reduction in individuals with overweight/obesity and chronic comorbidities: Systematic review and network meta–analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 2021. — 55 (16). — P. 917–925.
147. Lyons, E. J., Lewis, Z. H., Mayrsohn, B. G., & Rowland, J. L. Behavior change techniques implemented in electronic lifestyle activity monitors: A systematic content analysis. *Journal of Medical Internet Research*, 2014. — 16 (8). — e3469.
148. Patel, M. S., Asch, D. A., & Volpp, K. G. Wearable devices as facilitators, not drivers, of health behavior change. *Jama*, 2015. — 313 (5). — P. 459–460.

149. Mattison, G., Canfell, O., Forrester, D., Dobbins, C., Smith, D., Töyräs, J., & Sullivan, C. (2022). The Influence of Wearables on Health Care Outcomes in Chronic Disease: Systematic Review. *Journal of Medical Internet Research*, 24 (7), e36690. <https://doi.org/10.2196/36690>
150. Normahani, P., Kwasnicki, R., Bicknell, C., Allen, L., Jenkins, M. P., Gibbs, R., Cheshire, N., Darzi, A., & Riga, C. (2018). Wearable sensor technology efficacy in peripheral vascular disease (wSTEP): A randomized controlled trial. *Annals of Surgery*, 268 (6). P. 1113–1118.
151. Costa, P. D., Reis, A. H., & Rodrigues, P. P. (2013). Clinical and economic impact of remote monitoring on the follow-up of patients with implantable electronic cardiovascular devices: An observational study. *Telemedicine and E-Health*, 19 (2). P 71–80.
152. Smuck, M., Odonkor, C. A., Wilt, J. K., Schmidt, N., & Swiernik, M. A. (2021). The emerging clinical role of wearables: Factors for successful implementation in healthcare. *Npj Digital Medicine*, 4 (1). P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41746-021-00418-3>
153. Ku, J. P., & Sim, I. (2021). Mobile Health: Making the leap to research and clinics. *Npj Digital Medicine*, 4 (1). P. 1–4. <https://doi.org/10.1038/s41746-021-00454-z>

Технологические тренды в области имплантируемой и носимой электроники и модификаций возможностей человека. / И.А. Иванов, Д.В. Кислицын и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: 2022. — 126 с. — (4 том доклада «Глобальный ландшафт исследований и перспективных разработок в области укрепления человека», науч. ред. И.А. Иванов). — ISBN 978-0-3694-0896-9 (серия). — ISBN 978-0-3694-0900-3 (том).

Человек в современном обществе, находясь в непрерывном стрессе не имеет возможности уделять должное внимание своему здоровью. Нет времени для прохождения периодической диспансеризации, так как для это необходимо посещение медицинских учреждений. Подобные тенденции подтолкнули человечество к реализации систем персонального мониторинга показателей здоровья, реализуемых в виде «умных» носимых устройств. Но существующие на данный момент технологии не могут дать полноценной оценки состояния человека и требуют дальнейшего развития. В представленном томе доклада были проанализированы носимые устройства, обеспечивающие оценку различных физиологических и биологических показателей человека. В результате проведённого обзорно-аналитического исследования по материалам более чем 150 источников выявлены области, перспективные для прикладных исследований с последующей реализацией в виде отдельных устройств носимой электроники, а также определены основные потребности и степень готовности общества к регулярному применению современных носимых технологий.

Научное издание

4 том доклада «Глобальный ландшафт исследований и перспективных разработок в области укрепления человека»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ В ОБЛАСТИ ИМПЛАНТИРУЕМОЙ И НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И МОДИФИКАЦИЙ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА

Под научной редакцией *И.А. Иванова*

*Дизайн, компьютерная верстка и графика: студия
дизайна «Образ мысли»*

*Редактор, корректор: Ю.А. Емельянова,
О.В. Петрова*

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
Тел.: 8 (495) 772-95-90