

Рубрика: электрокардиостимуляция

© АННАЛЫ АРИТМОЛОГИИ, 2025

© Г.А. АВАНЕСЯН, Е.З. ГОЛУХОВА, А.Г. ФИЛАТОВ, А.С. САТЮКОВА, Я.Б. ЯХЬЯЕВ, М.А. БАЖИН, Д.И. МИНАЕВ, 2025

УДК 616.12-008.318-089

DOI: 10.15275/annaritmol.2025.3.2

БЕЗЭЛЕКТРОДНАЯ КАРДИОСТИМУЛЯЦИЯ

Тип статьи: обзорная статья

Г.А. Аванесян, Е.З. Голухова, А.Г. Филатов, А.С. Сатюкова, Я.Б. Яхьяев, М.А. Бажин, Д.И. Минаев

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева» Минздрава России, Рублевское ш., 135, Москва, 121552, Российская Федерация

Аванесян Грайр Араратович, канд. мед. наук, науч. сотр., сердечно-сосудистый хирург; orcid.org/0000-0001-5367-8382, e-mail: grair707@mail.ru

Голухова Елена Зеликовна, д-р мед. наук, академик РАН, директор; orcid.org/0000-0002-6252-0322

Филатов Андрей Геннадьевич, д-р мед. наук, заведующий отделением рентгенхирургической и интраоперационной диагностики и лечения аритмий; orcid.org/0000-0002-7026-7814

Сатюкова Анна Сергеевна, заведующий лабораторией экспертизы качества медицинской помощи, врач-кардиолог; orcid.org/0000-0001-5948-1193

Яхьяев Яхья Бийболатович, врач – сердечно-сосудистый хирург; orcid.org/0000-0002-0871-4468

Бажин Михаил Александрович, вед. инженер; orcid.org/0009-0008-2157-6478

Минаев Дмитрий Иванович, вед. инженер лаборатории; orcid.org/0009-0004-4084-7828

Безэлектродная кардиостимуляция (leadless pacing) представляет собой прогрессивную альтернативу традиционным электрокардиостимуляторам (ЭКС). Миниатюрные устройства, объединяющие в одном корпусе генератор и электрод, имплантируются непосредственно в полость правого желудочка, что устраняет необходимость в подкожном кармане и внутрисосудистых проводниках. Первые клинические имплантации подобных систем, таких как Nanostim и Micra, были выполнены в 2012–2013 годах. К 2023 г. число выполненных процедур превышает 200 000 по всему миру, а технология продолжает активно развиваться. Современные данные демонстрируют значительное снижение частоты инфекционных осложнений и отсутствия проблем с электродами у пациентов с безэлектродными ЭКС.

Настоящая статья представляет обзор существующих систем безэлектродной стимуляции (Nanostim, Micra, AVEIR), особенностей их имплантации и эксплуатации, а также сравнительный анализ с традиционными трансвенозными устройствами. Отдельное внимание уделено новым направлениям развития технологии – двухкамерной стимуляции, сочетанию с функцией дефибрилляции, возможностям самозарядки и интеграции с кардиоресинхронизирующей терапией. Рассматриваются также особенности применения безэлектродных ЭКС у различных категорий пациентов: пожилых, детей, пациентов с высоким инфекционным риском и с ограниченным венозным доступом. Таким образом, безэлектродная кардиостимуляция представляет собой перспективное направление современной аритмологии, способное существенно повысить безопасность и эффективность лечения пациентов с нарушениями ритма сердца. Рост клинического опыта и технический прогресс способствуют тому, что такие устройства становятся все более используемыми как в повседневной практике, так и в сложных клинических ситуациях.

Ключевые слова: безэлектродный кардиостимулятор, безэлектродная кардиостимуляция, Micra, Nanostim, AVEIR, кардиостимуляция у детей, осложнения кардиостимуляции, двухкамерная стимуляция

LEADLESS CARDIAC PACING

Г.А. Avanesyan, E.Z. Golukhova, A.G. Filatov, A.S. Satyukova, Ya.B. Yakhyayev, M.A. Bazhin, D.I. Minaev

Bakoulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery, Moscow, 121552, Russian Federation

Grair A. Avanesyan, Cand. Med. Sci., Researcher, Cardiovascular Surgeon; orcid.org/0000-0001-5367-8382, e-mail: grair707@mail.ru

Elena Z. Golukhova, Dr. Med. Sci., Academician of the Russian Academy of Sciences, Director; orcid.org/0000-0002-6252-0322

Andrey G. Filatov, Dr. Med. Sci., Head of Department; orcid.org/0000-0002-7026-7814

Anna S. Satyukova, Head of the Laboratory, Cardiologist; orcid.org/0000-0001-5948-1193

Yakhya B. Yakhyaev, Cardiovascular Surgeon; orcid.org/0000-0002-0871-4468

Mikhail A. Bazhin, Senior Engineer; orcid.org/0009-0008-2157-6478

Dmitry I. Minaev, Senior Engineer; orcid.org/0009-0004-4084-7828

Leadless cardiac pacing offers an innovative alternative to conventional systems. Miniaturized devices that combine both the pulse generator and the electrode in a single capsule are implanted directly into the right ventricular cavity, eliminating the need for venous leads and subcutaneous pockets. The first clinical implantations of such systems – including Nanostim and Micra – were performed in 2012–2013. By 2023, over 200,000 leadless pacemakers had been implanted globally, and the technology continues to advance. Contemporary clinical data demonstrate a significant reduction in infection rates and electrode-related complications in patients with leadless systems.

This article provides a comprehensive review of currently available leadless pacing systems (Nanostim, Micra, AVEIR), implantation techniques, and practical considerations, along with a comparative analysis against traditional transvenous devices. Special attention is given to future directions in technology development, including dual-chamber pacing, integration with defibrillation capabilities, energy harvesting solutions, and potential applications in cardiac resynchronization therapy. The article also discusses specific indications for various patient groups, including elderly patients, pediatric populations, and those with high infection risk or limited venous access.

Thus, leadless cardiac pacing represents a promising direction in modern arrhythmology, with the potential to significantly enhance the safety and effectiveness of cardiac rhythm management. With growing clinical experience and ongoing technological innovation, these systems are becoming increasingly attractive both in routine practice and in complex clinical scenarios.

Keywords: leadless pacemaker, leadless cardiac pacing, Micra, Nanostim, AVEIR, pediatric pacing, pacing complications, dual-chamber stimulation

Введение

Традиционные электрокардиостимуляторы (ЭКС) с трансвенозными электродами за последние десятилетия спасли жизнь и улучшили прогноз тысячам пациентов с брадикардией. Однако наличие проводников (электродов) и генератора под кожей связано с риском разнообразных осложнений. По данным крупных регистров, до 10–12% пациентов имеют осложнения после имплантации постоянного кардиостимулятора – инфекционные процессы (эндокардит, инфекция ложа устройства), дислокацию или поломку электрода, тромбозы вен, повреждение клапанов сердца и др. [1–3]. В исследовании FOLLOWPACE (Нидерланды) общее число осложнений в течение первых месяцев после имплантации достигло 12,4%, а в долгосрочном периоде около 18% пациентов переносили хотя бы одно осложнение [1]. Анализ датского национального регистра также показал существенный уровень неблагоприятных событий, связанных с устройствами, включая инфекции и механические проблемы [2]. Кроме того, традиционные системы требуют формирования «кармана» под кожей для генератора, что несет риск гематом и инфекций, а присутствие электродов в венозном русле может приводить к окклюзии сосудов и повреждению трикуспи-

дального клапана [2, 3]. Таким образом, во всем мире крайне актуальна задача снижения доли подобных осложнений и улучшения качества жизни пациентов с кардиостимуляторами.

Безэлектродная кардиостимуляция (leadless pacing) – инновационная технология, призванная устранить многие недостатки трансвенозных устройств. В данной системе миниатюрный кардиостимулятор, содержащий в одном корпусе и генератор, и электрод, имплантируется прямо в полость сердца (обычно в правый желудочек) без проведения проводов по венам и без создания подкожного «кармана». Первые успешные имплантации полностью внутрисердечных стимуляторов были выполнены в 2012–2013 годах [4, 5]. С тех пор технология быстро развивалась: по данным на 2023 г., в мире имплантировано свыше 200 000 безэлектродных кардиостимуляторов [4]. Ожидается, что распространенность таких устройств будет расти по мере накопления клинического опыта и улучшения технических характеристик.

Безэлектродные кардиостимуляторы позволяют существенно снизить частоту осложнений, связанных с электродами и ложем ЭКС. В ряде исследований не было отмечено ни одного случая инфекционного эндокардита или инфекции

устройства при наблюдении за пациентами с безэлектродными кардиостимуляторами, тогда как у пациентов с классическими системами инфекционные осложнения встречаются в 1–2% случаев [3, 6]. Также отсутствует риск дисфункции или повреждения электродов, что особенно важно для молодых пациентов, которым устройство может служить десятилетие и более. Устранение электродов из просвета вен предотвращает развитие стенозов вен и проблем с трикуспидальным клапаном. Для определенных категорий больных, например пациентов с повторными инфекциями кардиоустройств в анамнезе или с ограниченным венозным доступом, технология безэлектродной стимуляции открывает новые возможности безопасной стимуляции [7]. В свете этих преимуществ, а также появления новых поколений устройств тема безэлектродной кардиостимуляции является актуальной и перспективной для кардиологии и аритмологии.

Настоящая статья представляет обзор литературы и современных данных о безэлектродных кардиостимуляторах, включая историю развития технологии, текущее состояние (устройства Nanostim, Micra, AVEIR), методики их имплантации, сравнение с традиционными стимуляторами, а также анализ новых подходов (двухкамерные системы, комбинация с дефибрилляторами, кардиоресинхронизирующая терапия, системы самозарядки). Особое внимание уделено особенностям применения у разных групп пациентов (дети, пожилые, пациенты с высоким риском осложнений), а также вопросам эффективности, безопасности и экономической целесообразности.

Эволюция технологий безэлектродной кардиостимуляции

Ранние разработки. Идея создания автономного внутрисердечного кардиостимулятора без проводов восходит еще к 1970-м годам, когда были описаны первые эксперименты с «самостоятельным» стимулятором, помещаемым в сердце [6]. Однако только к 2010-м годам прогресс в миниатюризации электроники и батарей позволил реализовать эту концепцию на практике. Первым в клиническую практику внедрен прибор Nanostim (St. Jude Medical/Abbott) – цилиндрический стимулятор длиной ~42 мм и объемом ~1,0 см³, оснащенный винтовым фиксатором-электродом на конце [4, 5]. Nanostim был рассчитан на однокамерную сти-

муляцию правого желудочка в режиме VVI(R) с частотной адаптацией за счет встроенного датчика температуры [4]. Имплантация Nanostim впервые выполнена в 2013 г.; всего в период с 2012 по 2017 г. было имплантировано более 1400 таких устройств в рамках клинических исследований и ранней практики [4, 5]. Первое пилотное исследование (LEADLESS) с участием 33 пациентов продемонстрировало принципиальную осуществимость метода и приемлемые ранние результаты [5]. Тем не менее уже на начальном этапе выявились и проблемы: у первого же пациента произошла тампонада сердца вследствие перфорации во время имплантации, а другой случай потребовал извлечения устройства, которое через незакрытое овальное окно случайно попало в левый желудочек [4]. Более масштабное исследование LEADLESS II (526 пациентов) подтвердило высокую эффективность стимуляции, но также указало на риск серьезных осложнений: частота перфорации сердца достигала ~1,5%, доля случаев эмболии устройства и дислокации составила около 1%, требовались повторные вмешательства при повышении порога стимуляции [5]. Кроме того, в процессе последующего наблюдения выявился дефект батареи у части устройств Nanostim, приводивший к преждевременному истощению источника питания. В 2017 г. производитель вынужден был отозвать этот электрокардиостимулятор с рынка: все имплантированные устройства подлежали замене по мере разряда, новые имплантации были прекращены [4]. Таким образом, хотя Nanostim сыграл пионерскую роль, его использование оказалось ограниченным из-за выявленных технических проблем и осложнений.

Опыт применения Nanostim подготовил почву для разработки более совершенного устройства – Micra (Medtronic). Первый имплантат Micra был установлен в 2014 г., а к настоящему времени накоплен наибольший опыт использования этой системы [4]. Micra VR представляет собой миниатюрный капсулообразный стимулятор длиной ~25–26 мм, массой ~2 г, с четырьмя гибкими фиксаторами (нитьевыми «тинами») из нитинола для крепления в мышце правого желудочка [4]. Объем устройства около 0,8 см³ – менее 2% объема полости правого желудочка, что минимизирует влияние на гемодинамику [4]. В отличие от предшественника, Micra не имеет винтового электрода, а удерживается за счет упругих уси-

ков, проникающих в эндокард. Такая конструкция изначально не предполагала простого извлечения после имплантации (отсутствует механизм обратного выкручивания), однако позиционирование и фиксацию Micra при имплантации возможно скорректировать: устройство соединено с доставляющим катетером и может несколько раз прикрепляться и отсоединяться от стенки желудочка до окончательной имплантации, позволяя подобрать оптимальное место с низким порогом стимуляции [5]. Micra также обеспечивает однокамерную частотно-адаптивную стимуляцию (VVI(R)) – частотная адаптация реализована с помощью встроенного акселерометра, реагирующего на движение тела [4].

Клинические результаты применения Micra показали значительное улучшение профиля безопасности по сравнению с ранее испытанным Nanostim. В первом многоцентровом исследовании Micra IDE (включавшем 725 пациентов) успешная имплантация устройства была достигнута в 99,2% случаев, серьезные осложнения встречались менее чем у 5% пациентов [8]. Ни в одном случае не возникло инфекционного эндокардита или инфекций в зоне имплантации и не было зарегистрировано случаев отказа электрода, что резко контрастирует с историческими данными по традиционным ЭКС [3, 6, 8]. В последующем в пострегистрационном международном регистре (Micra PAR, >1800 пациентов) успешность имплантации возросла до 99,6%, а совокупная частота осложнений за 1 год составила около 2,7%, что значительно ниже таковой в группе сравнения с обычными однокамерными стимуляторами (примерно 4–5%) [6, 9]. Особенно выражена разница по инфекционным и механическим осложнениям: отсутствуют проблемы с ложем ЭКС и электродами. Таким образом, устройство Micra зарекомендовало себя как безопасная и эффективная система. В настоящее время накоплен опыт уже более 200 тыс. имплантаций Micra по всему миру [4]. Долговременные данные тоже обнадеживают: например, 5-летнее наблюдение за пациентами с Micra показало стабильность параметров стимуляции и отсутствие новых типов осложнений; суммарная «выживаемость» системы (без отказов и необходимости вмешательств) превысила 95% [9].

Важным шагом в совершенствовании технологии стало появление модификации Micra AV, представленной в 2020 г. Устройство Micra AV по аппаратной части идентично версии VR,

но снабжено специальным алгоритмом обнаружения предсердной активности на основе акселерометра [10]. Это позволило реализовать ограниченную форму двухкамерной работы: Micra AV функционирует в режиме VDD, то есть обеспечивает атриовентрикулярную (AB)-синхронизированную желудочковую стимуляцию, распознавая собственные сокращения предсердий. Устройство может поддерживать физиологическую последовательность сокращений предсердия и желудочка у пациентов с АВ-блокадой, если собственный ритм предсердий сохраняется. Клинические испытания (MARVEL 1 и 2) подтвердили достижение АВ-синхронности у большинства пациентов с Micra AV при низких и умеренных частотах сердечных сокращений [10]. Однако ограничения такого подхода очевидны: во-первых, Micra AV не может стимулировать предсердие при синдроме слабости синусового узла; во-вторых, при частоте сердечных сокращений выше ~110 уд/мин точность слежения за предсердиями снижается, и АВ-синхронизация теряется [10]. Тем не менее внедрение устройства Micra AV позволило применять безэлектродные стимуляторы и у пациентов с АВ-блокадами, которым ранее требовалась двухкамерная система.

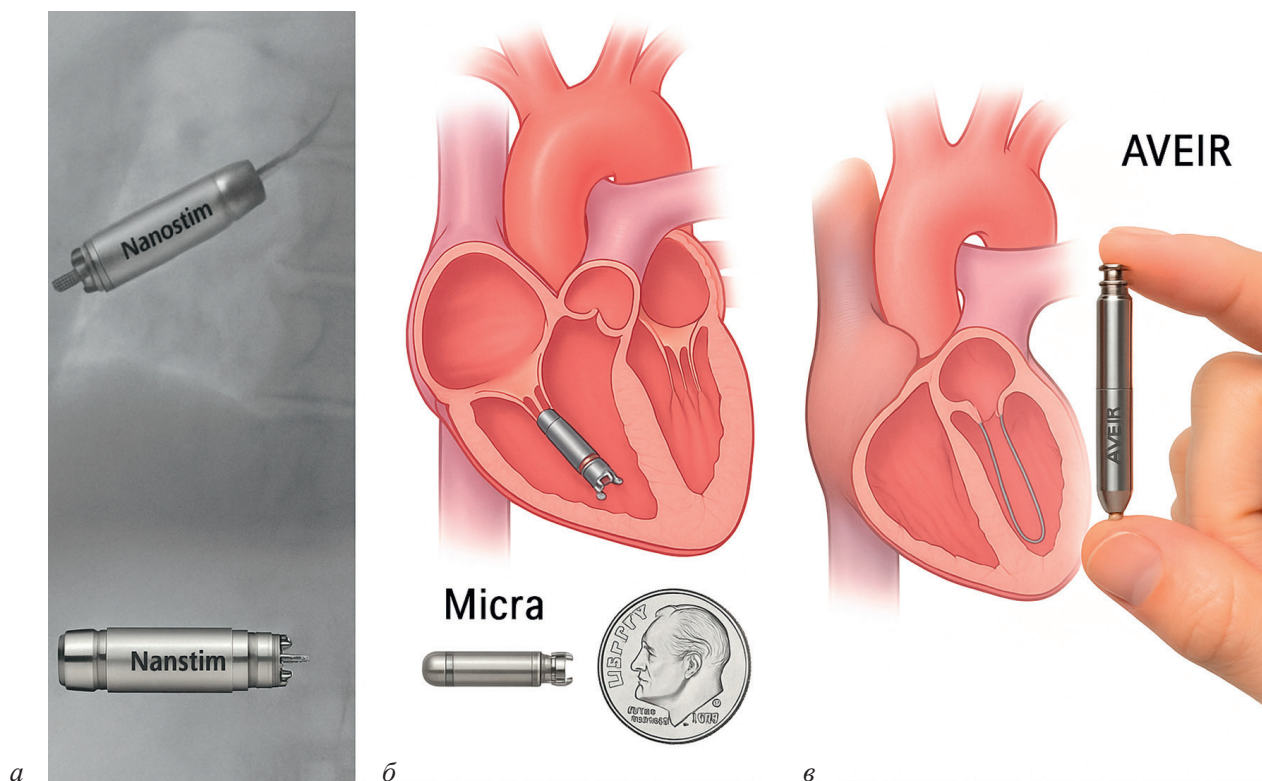
Современное поколение безэлектродных ЭКС. Последним достижением в области безэлектродных кардиостимуляторов является платформа AVEIR (Abbott). Производитель учел опыт использования Nanostim и разработал новую систему, включающую как желудочковый модуль (AVEIR VR), так и экспериментальный предсердный модуль, предназначенный для совместной работы в будущем. Желудочковый стимулятор AVEIR сопоставим по размерам с предшественниками (длиной около 38 мм, объем ~1,1 см³) и оборудован винтовым двухспиральным фиксатором, позволяющим надежно закреплять устройство в миокарде и при необходимости выкрутить его обратно [4]. Ключевое отличие – реализована возможность извлечения и замены AVEIR даже спустя длительное время после имплантации: корпус устройства имеет специальное крепление для захвата катетером, а электроод-винт может отвинчиваться, что призвано облегчить снятие стимулятора при разряде батареи или возникновении проблем [4]. Устройство AVEIR VR одобрено для однокамерной стимуляции желудочка и обеспечивает режим VVI(R) с частотной адаптацией. По данным первого исследования эффективности

(Aveir VR), средний возраст пациентов составил ~69 лет, успешность имплантации превышала 95% [8]. В сравнительных анализах с Micra система AVEIR показала схожие результаты по порогам стимуляции и осложнениям [11]. Таким образом, на рынке сейчас присутствуют две основные платформы – Medtronic Micra и Abbott AVEIR, обе являются эффективными однокамерными стимуляторами без проводов-электродов.

Важно отметить, что компания Abbott уже реализовала концепцию полноценной двухкамерной безэлектродной системы на базе AVEIR. В 2023 г. опубликованы результаты первого в мире клинического исследования двойной имплантации – пациентам одновременно устанавливали два безэлектродных устройства: одно в правое предсердие, другое – в правый желудочек [12]. Эти два модуля способны безэлектродно синхронизировать работу по технологии «implant-to-implant» – обмен сигналами между предсердным и желудочковым стимуляторами позволяет добиться режима DDD, то есть полной двухкамерной стимуляции без электродов. В исследовании AVEIR Dual-Chamber (300 пациентов) успешная имплантация обоих моду-

лей достигнута в 98% случаев; у 97% пациентов была обеспечена стабильная АВ-синхронность более 95% времени при различных положениях тела [12]. Отмечено, правда, незначительное увеличение числа осложнений за счет предсердного компонента: в остром периоде ~1,3% устройств из предсердия смещались с места, требуя повторной фиксации, а в ходе наблюдения почти 2,7% пациентов перенесли дислокацию предсердного стимулятора, потребовавшую репозиции системы [12]. В большинстве случаев такие события произошли на этапе освоения техники. В целом же появление двухкамерного безэлектродного кардиостимулятора стало важнейшим достижением, открывающим путь к расширению показаний для безэлектродной стимуляции у пациентов с сочетанными нарушениями ритма.

Таким образом, эволюция технологии безэлектродного кардиостимулятора прошла путь от первых опытов (Nanostim), через успешную миниатюризацию и распространение (Micra), к современным многофункциональным системам (Micra AV, AVEIR, двухкамерные конфигурации) (см. рисунок). Ниже рассмотрены мето-



Визуализация трех современных моделей безэлектродных кардиостимуляторов: Nanostim (St. Jude Medical) (а), Micra (Medtronic) (б) и AVEIR (Abbott) (в). Представлены рентгенологические и схематические изображения устройств, демонстрирующие их расположение в полости правого желудочка и миниатюрные размеры

дические аспекты имплантации этих устройств и их сравнение с традиционными системами.

Методологический обзор: имплантация, доступы и анатомические аспекты

Техника имплантации через бедренный доступ. Стандартным методом установки безэлектродного кардиостимулятора является трансвенная имплантация через бедренную вену под рентгеновским контролем. Процедура выполняется в рентгенооперационной (кардиохирургической или электрофизиологической лаборатории). Через прокол бедренной вены вводится интродьюсер большого диаметра (обычно 23–27 F, внешний диаметр порядка 7–9 мм) до устья нижней полой вены. Затем по проводнику в правый желудочек сердца подается доставляющий катетер с закрепленным внутри стимулятором [13]. Кончик катетера ориентируют к области целевого прикрепления – чаще всего это область септальной (перегородочной) трабекулы правого желудочка или верхушка правого желудочка. Положение выбирается оператором на основе анатомии пациента и характеристик сигнала/ порога стимуляции: предпочтение отдается позициям с высоким амплитудным сигналом ЭКГ, низким порогом стимуляции и достаточной толщиной миокарда для безопасной фиксации [14]. Когда нужная позиция достигнута, кардиостимулятор частично выдвигается из катетера и фиксируется к эндокарду: в случае Micra – путем раскрытия и зацепления нитиноловых усиков в трабекулах, в случае AVEIR – путем вворачивания спирального фиксатора в мышцу. После первичной фиксации обязательно выполняется тестирование системы *in situ*: оцениваются амплитуда сигнала (R- или P-волны), порог стимуляции (минимальное напряжение импульса, вызывающее сокращение) и ток утечки. Если параметры неудовлетворительные (низкий сигнал, высокий порог и т. п.), устройство можно репозиционировать. Модель Micra допускает примерно до 2–3 повторных фиксаций путем захвата уже установленного устройства специальной петлей катетера и перемещения в новое место [5]. Устройство AVEIR можно аккуратно выворачивать и повторно завинчивать в другое место до тех пор, пока не будет нажата кнопка электрического отцепления внутри катетера [4]. После получения оптимальных параметров стимуляции кардиостимулятор окончательно освобождается от доставляющего катетера, ко-

торый затем извлекается из организма. Место пункции бедренной вены ушивается или тампонируется. Вся процедура имплантации безэлектродного устройства по времени сравнима или короче, чем установка обычного однокамерного ЭКС, и обычно длится 20–40 мин при условии опытного оператора [13]. Пациент, как правило, находится под седацией или кратковременным наркозом, поскольку работа с толстыми интродьюсерами может быть дискомфортной.

Альтернативные доступы. У некоторых пациентов стандартный бедренный доступ затруднен – например, при тромбозе или окклюзии нижней полой/бедренной вены, наличии каво-фильтра или у маленьких детей, у которых размеры сосудов не позволяют ввести большой интродьюсер. В таких случаях разработаны альтернативные техники. Одним из методов является *суправенозный (через верхнюю полую вену) доступ* – чаще всего через правую яремную вену. Имплантация через яремную вену требует специальных манипуляций с длинным катетером и ориентации его в сердце «сверху вниз», однако ряд центров успешно применил эту методику у детей и взрослых с противопоказаниями к бедренному доступу [15]. В частности, у детей массой <30 кг использование внутренней яремной вены описано как безопасное и эффективное: меньшая длина пути до сердца и более прямой угол входа способствуют контролю над катетером в маленьком сердце [15, 16]. Хотя такой доступ пока не получил широкого распространения, он демонстрирует возможность установки устройств Micra и AVEIR практически при любых вариантах венозной анатомии, что важно для особых категорий больных.

Анатомические аспекты фиксации. После имплантации безэлектродный стимулятор находится полностью внутри полости сердца, выступая из стенки лишь на несколько миллиметров. Для минимизации влияния на клапаны и кровоток выбирается участок стенки правого желудочка вдали от створок трикуспидального клапана и зоны выводного отдела. Исследования показывают, что оптимальными местами являются септальная стенка в области выводного отдела или верхушки: там устройство меньше подвержено смещению и не препятствует нормальной работе клапана [14]. У пациентов с анатомическими особенностями (например, сильно трабекулированный желудочек, кардиомиопатия) важно подобрать такую трабекулу или участок,

где устройство надежно закрепится. Устройство Micra за счет своих усиков обычно «вплетается» в сеть трабекул и эндотелизируется со временем. Модель AVEIR фиксируется винтом, проникающим в мышцу на несколько миллиметров, и также обрастает фиброзной тканью. Полное эндотелизирование устройства происходит в течение нескольких недель: вскоре после имплантации устройство покрывается тонким слоем эндокарда, изолируя его от контакта с кровью [5]. Это снижает риск тромбоза и закрепляет стимулятор на месте. Патологоанатомическое исследование через год после имплантации Micra показало прочное врастание устройства в стенку без выраженного воспаления [5]. Таким образом, правильно имплантированный безэлектродный стимулятор становится частью структуры сердца, функционально заменяя собой кончик электрода традиционного ЭКС.

Возможность извлечения и замены. Важный практический вопрос – что делать, когда батарея безэлектродного стимулятора разрядится (через 8–15 лет службы, в зависимости от режима) или возникнет необходимость удалить устройство (например, при инфекции или дислокации). Разработчики предусматривают два подхода. Первый – *длительное оставление устройства*: благодаря малым размерам «старый» стимулятор можно оставить в сердце как «имплантат», а новый установить рядом, если позволяет место [4]. Препринимические испытания на моделях показали, что в правом желудочке могут одновременно безопасно функционировать до трех устройств Micra, не мешая друг другу [4]. Действительно, описаны случаи успешной имплантации второго устройства при исчерпании батареи первого; «старое» устройство при этом было выключено и оставлено на стенке желудочка [17]. Альтернативный подход – *экстракция устройства*. Для Nanostim изначально существовал специальный катетер для захвата и отвинчивания устройства, и в ряде случаев изъятие проходило успешно даже спустя несколько лет после имплантации [5]. С системой Micra ситуация сложнее из-за конструкции фиксаторов, но и здесь накоплен опыт извлечения: с помощью петли и катетера возможно захватить выступающую петлю на конце устройства и оторвать стимулятор от эндокарда. По многоцентровым данным, вероятность успешного извлечения устройств Micra снижается по мере увеличения срока имплантации: в течение первых 6–12 мес

устройство удавалось удалить примерно в 80–100% попыток, тогда как спустя >2 лет – существенно реже из-за прочного врастания [17]. Новая система AVEIR специально спроектирована с упором на извлечение: как уже отмечалось, винтовой фиксатор позволяет выкрутить устройство, а специальный «хвостовик» – легко захватить его катетером [4]. Первые отчеты свидетельствуют о высокой успешности удаления AVEIR при необходимости, даже спустя месяцы после имплантации [11]. В целом стратегия выбора – извлекать или оставлять – зависит от клинической ситуации. При инфекции устройство подлежит удалению, тогда как при плановой замене из-за разряда батареи возможно имплантировать новое, не трогая старое, если нет ограничения места или риска взаимодействия.

Сравнение с традиционными транспроводящими кардиостимуляторами

Безэлектродные стимуляторы изначально создавались с целью устранения недостатков классических ЭКС, поэтому при их сравнении отмечаются как очевидные преимущества, так и некоторые ограничения. Ниже приведены ключевые аспекты сравнения.

– *Хирургический доступ и инвазивность.* Классический ЭКС требует хирургического формирования ложа (чаще подключичного) и туннелирования электродов по вене, тогда как безэлектродное устройство устанавливается через прокол в бедре, без разрезов и имплантации громоздких компонентов под кожу. Отсутствие хирургической раны у безэлектродного стимулятора приводит к меньшей боли после процедуры и более быстрому восстановлению. Также отсутствует заметный косметический дефект – у пациента нет рубца и выпуклого корпуса прибора на грудной клетке, что важно для молодых и худых пациентов с эстетической точки зрения.

– *Инфекционные осложнения.* Традиционные кардиостимуляторы сопряжены с риском инфекции ложа и/или эндокардита, особенно у пациентов с сахарным диабетом, почечной недостаточностью, иммунодефицитом. Риск серьезной инфекции при обычной системе составляет около 1–2% за время службы прибора, а при повторных операциях (замена ЭКС, ревизия системы) возрастает до 3–5% [6, 18]. Инфекция электрокардиостимулятора – очень тяжелое осложнение, часто требующее полной экстракции системы и длительной антибиотикотерапии.

В случае же безэлектродных стимуляторов инфекционные осложнения возникают значительно реже. В крупных исследованиях применения устройства Micra не было зарегистрировано ни одного случая инфекционного эндокардита, а общее число инфекций (включая инфекции в месте пункции) не превышало 0,4% [6, 9]. Отсутствие подкожного имплантата и проводников минимизирует входные ворота для инфекции. Таким образом, безэлектродная система особенно показана пациентам с повышенным инфекционным риском.

– *Механические и технические осложнения.* В классических системах нередко случаи дислокации электрода (2–5% в первые недели), его перелома или износа изоляции (нарастают со временем), а также нарушения функции из-за смещения позиции электрода (например, стимуляция диафрагмы при движении электрода) [3]. Безэлектродное устройство после фиксации практически исключает проблему позднего смещения – по данным наблюдений, вероятность миграции безэлектродного стимулятора после выписки составляет <1% [5]. Нет риска перелома провода, так как отсутствуют проводники. Также отсутствует проблема трения электрода о клапаны сердца – один из факторов хронической трикуспидальной регургитации в трансвенозных системах [19]. Исследования эхокардиографических параметров показали, что через 12 мес после имплантации безэлектродного стимулятора функция трехстворчатого клапана не ухудшается, тогда как у части пациентов с традиционными ЭКС отмечается нарастание регургитации из-за постоянного присутствия электродов в створках [19]. В то же время специфика безэлектродных систем – риск перфорации стенки сердца острым концом устройства при имплантации. У транвенозных ЭКС тоже существует риск перфорации электродом, но безэлектродный ЭКС более массивный и имплантируется непосредственно через стенку, что требует осторожности. По агрегированным данным, частота перфорации или тампонады при имплантации Micra составляет ~1% или менее, что сопоставимо с показателем классических систем, тогда как в ранних сериях с устройством Nanostim этот показатель был выше (до 1,5%) [5, 8]. С улучшением техники имплантации этот риск снизился.

– *Функциональность и показания.* Главное ограничение первого поколения безэлектродных

стимуляторов – работа только в однокамерном режиме. Это означает, что пациентам, которым жизненно необходима стимуляция предсердий или синхронная работа предсердий и желудочков (например, при синдроме слабости синусового узла, полной АВ-блокаде с синдромом «тахи-бради» и пр.), однокамерный стимулятор не обеспечит оптимальной гемодинамики. Классические двухкамерные ЭКС в таких случаях предпочтительнее. До недавнего времени почти 10–20% пациентов, нуждающихся в ЭКС, имели изолированную патологию АВ-проведения или хроническую мерцательную аритмию с медленным желудочковым ответом – именно они были кандидатами на установку однокамерных безэлектродных устройств [1]. Однако с появлением Micra AV границы расширились: пациенты с АВ-блокадой и сохраненным синусовым ритмом тоже могут получать безэлектродную стимуляцию с частичным сохранением АВ-синхронности [10]. Более того, внедрение двухкамерных систем (таких как AVEIR DR) в ближайшем будущем позволит охватить и тех, кому нужна стимуляция предсердий и желудочков одновременно [12]. Тем не менее в 2025 г. двухкамерные безэлектродные устройства еще не получили массового распространения, поэтому выбор технологии пока зависит от показаний. Также пока отсутствуют безэлектродные системы кардиоресинхронизирующей терапии (для сердечной недостаточности) – все пациенты, проходящие сердечную ресинхронизирующую терапию (СРТ), получают проводные системы, которые могут стимулировать оба желудочка.

– *Диагностические возможности и программирование.* Оба типа устройств – и традиционные, и современные – позволяют дистанционно мониторировать пациента через телеметрические системы производителя. Однако отсутствие субклавиального генератора означает, что у устройства нет поверхности для стандартной ЭКГ-проверки (магнитом или программатором через грудную клетку). Вместо этого связь с безэлектродным стимулятором осуществляется через специальный программатор, помещаемый над областью сердца (груди). В целом функциональность мониторинга сходна. Одна из инноваций устройств Micra/AVEIR состоит в том, что некоторые модели позволяют передавать через программатор внутрисердечные ЭКГ-сигналы, регистрируя, например, эпизоды аритмий (фибрилляции предсердий)

подобно тому, как это делают современные ЭКС. Программирование параметров (частоты, порога чувствительности, мощности импульса) у безэлектродных пейсмекеров также производится безэлектродно по радиочастотному каналу, аналогично обычным стимуляторам.

– *Срок службы и замена.* Средний срок работы батареи однокамерного безэлектродного стимулятора составляет около 8–12 лет в зависимости от нагрузки (процента стимуляции) [4, 8]. Это сопоставимо с показателем современных транзенозных ЭКС, хотя некоторые экономичные двухкамерные модели могут служить и 12–15 лет. Важное отличие – когда батарея прибора истощится, замена подразумевает имплантацию нового устройства, так как простой замены генератора, как в обычной системе, не существует. Это может означать наличие нескольких имплантированных устройств в сердце у одного пациента. Как отмечалось, до трех устройств в желудочке, вероятно, не окажут существенного влияния [4], но дальнейшие исследования необходимы для оценки безопасности множества «оставленных» капсул. В противовес этому

при традиционной системе генератор меняют на новый, сохраняя исходные электроды (если они исправны), то есть количество инородных объектов не увеличивается. Однако каждый повторный разрез ложа увеличивает риск инфекции и других осложнений [18]. В случае же безэлектродного кардиостимулятора повторная имплантация – это вновь пункция вены, что относительно менее травматично, хотя и несет риски, связанные с каждой новой процедурой.

В таблице суммированы основные различия между традиционными и безэлектродными кардиостимуляторами.

В целом для пациента с показаниями к однокамерной стимуляции, особенно при наличии факторов риска осложнений, безэлектродный кардиостимулятор представляет явные преимущества по безопасности. Однако если требуется сложная стимуляция (двухкамерная, ресинхронизирующая) или дефибрилляция, безэлектродные системы пока не в полной мере заменяют классические устройства. Далее рассмотрены новые подходы, призванные устранить эти ограничения.

Сравнительная характеристика имплантированного ЭКС и безэлектродной системы кардиостимуляции

Аспект	Традиционный ЭКС (с электродами)	Безэлектродный кардиостимулятор
Имплантация	Хирургическая операция: разрез для ложа, проведение электрода через вену	Минимально инвазивная: пункция бедренной (или яремной) вены, катетерная имплантация внутри сердца
Компоненты	Генератор + электрод(ы); под кожей – видимая припухлость	Только внутрисердечный модуль; снаружи ничего не видно
Риск инфекции	1–3% (ложе, эндокардит); риск повышается при замене ЭКС [6, 18]	Менее 1%; инфекции крайне редки, нет подкожного ложа [6, 9]
Риск механических осложнений	Дислокация электрода ~2–5% случаев; перелом или износ электрода со временем; тромбозы вен, повреждение клапанов [3]	Дислокация устройства <1% случаев; перелом отсутствует; влияние на клапаны минимально [5, 19]
Параметры стимуляции	Любые режимы (однокамерный, двухкамерный, СРТ); широкие показания	Пока в основном однокамерный (VVI, VDD); двухкамерные – экспериментально [10, 12]
Долговечность	8–15 лет до замены батареи; замена = операция в ложе, ЭКС новый, электроды старые	8–12 лет до разряда; «замена» = имплантация нового устройства (старое остается или извлекается)
Особые показания	При необходимости СРТ или антибрадистимуляции у пациентов с ИКД – стандартный подход (или эпикардиальный); ограничений по размерам нет	Идеален при невозможности проводить электрод (окклюзия вен, механический трикуспидальный клапан, высокий риск инфекции); ограничено применение у очень маленьких детей (размеры сердца)

Современные и будущие подходы в безэлектродной стимуляции

Двухкамерные безэлектродные системы.

Как отмечено выше, значительная доля пациентов, нуждающихся в кардиостимуляции, имеет нарушения ритма, требующие стимуляции более чем одной камеры сердца (например, патология синусного узла + АВ-блокада). К 2025 г. достигнут результат в разработке двухкамерного безэлектродного пейсмейкера: впервые создана связанная пара устройств – предсердный и желудочковый стимуляторы, способные координировать работу друг с другом. Пионерские исследования (в частности, R.E. Knops et al., 2023) продемонстрировали возможность поддержания полноценного режима DDD с помощью двух модулей AVEIR, коммуницирующих между собой по радиоканалу [12]. Практически это выглядело так: один мини-стимулятор фиксируется в правом предсердии (обычно в области ушка правого предсердия), второй – в правом желудочке; предсердный стимулятор отслеживает ритм предсердий и передает сигналы желудочковому модулю о необходимости стимуляции, обеспечивая тем самым последовательность P-QRS. Поскольку у пациента отсутствуют какие-либо проводные соединения, крайне важно, чтобы безэлектродная связь была надежной и практически мгновенной. Результаты испытаний показали, что в подавляющем большинстве случаев синхронизация достигалась [12]. Таким образом, двухкамерные безэлектродные системы перестали быть теорией и начали внедряться. Ожидается, что в ближайшие годы такие устройства получат регуляторное одобрение, и пациентам станет доступна опция полностью безэлектродной физиологической стимуляции двух камер сердца. Конечно, есть технические вызовы – обеспечение долговечности батарей при удвоенной нагрузке, предотвращение взаимных помех, обучение врачей более сложной имплантации (предсердный модуль несколько труднее фиксировать). Но преимущества очевидны: пациенты с двумя безэлектродными стимуляторами по-прежнему свободны от подкожного ложа и электродов, что уменьшает риски осложнений, о которых шла речь ранее.

Комбинация с подкожными дефибрилляторами (S-ICD). У категории пациентов с риском жизнеугрожающих аритмий устанавливаются имплантируемые кардиовертеры-дефибрилляторы (ИКД). Традиционные системы

ИКД часто включают функцию стимуляции (антитахикардической или антибрадикардической) и используют трансвенозные электроды, что роднит их с ЭКС. Однако в последние годы появились подкожные ИКД – устройства, не требующие электродов в сердце (дефибрилляционная спираль располагается подкожно вдоль грудины). Главный их недостаток – отсутствие функции постоянной стимуляции; ИКД может лишь дефибриллировать при фибрилляции желудочков, но не может профилактически стимулировать сердце при брадикардии или купировать тахикардию антитахистимуляцией (АТС). Именно в этой ситуации целесообразно использовать сочетание технологий: S-ICD, обеспечивающий защиту от фатальных аритмий, и безэлектродный кардиостимулятор, отвечающий за ритм и при необходимости выполняющий АТС. Первые такие комбинированные системы уже проходят испытания. Так, в исследовании MODULAR ATP два устройства – подкожный дефибриллятор EMBLEM и специальный стимулятор EMPOWER (разработки Boston Scientific) – работают скоординированно: стимулятор имплантируется в правый желудочек и может по команде ИКД выполнять быстрое запрограммированное стимулирование при желудочковой тахикардии, а также служит как обычный кардиостимулятор при брадикардии [20]. В недавно опубликованных результатах продемонстрирована успешная реализация такой модульной системы: у 89% пациентов имплантация обоих устройств прошла без осложнений, система корректно распознавала аритмии и проводила стимуляцию, связь между компонентами была надежной [20]. Ранее, еще до появления специальных «связанных» устройств, врачи пробовали устанавливать ИКД одновременно с устройством Micra в надежде, что оно будет обеспечивать резервную стимуляцию и тем самым компенсировать недостаток ИКД. Отдельные случаи и небольшие серии показали осуществимость такого подхода: система Micra успешно работала совместно с подкожным дефибриллятором, не вызывая взаимных помех, и пациенты получали эффект от обеих технологий [21, 22]. Таким образом, сочетание ИКД с безэлектродным кардиостимулятором позволяет создать полностью безэлектродную систему управления ритмом с защитой от фибрилляции – ни одного электрода внутри сосудов. Это особенно ценно у пациентов с трудным венозным доступом или

тех, кто перенес инфекцию системы. Вероятно, в будущем производители интегрируют эти решения, и комбинированные системы станут стандартом для определенной группы пациентов (например, с показаниями к ИКД и хронической брадикардией).

Безэлектродная СРТ (безэлектродная ресинхронизирующая терапия)

Сердечная ресинхронизирующая терапия применяется у пациентов с сердечной недостаточностью и нарушениями проводимости (блокада левой ножки пучка Гиса) для одновременной стимуляции левого и правого желудочков, что улучшает синхронность сокращений. Стандартная СРТ предполагает минимум три электрода: в правом предсердии, правом желудочке и через венозный синус – на эпикард левого желудочка. Установка левого желудочкового электрода бывает затруднена и сопряжена с осложнениями. В последние годы появился альтернативный метод – безэлектродная эндокардиальная стимуляция левого желудочка с помощью системы *безэлектродной эндокардиальной стимуляции СРТ* (БЭС-СРТ) [23]. Эта технология не является «безэлектродным пейсмейкером» в строгом смысле, но позволяет отказаться от проводка в коронарном синусе: в полость левого желудочка имплантируется крошечный приемник-электрод, который внешним ультразвуковым излучателем через грудную стенку активируется в нужный момент сердечного цикла, вызывая сокращение левого желудочка. БЭС-СРТ применяется в комбинации с обычным ЭКС или ИКД, отвечающим за стимуляцию правого желудочка и синхронизацию запуска ультразвукового импульса [23]. Таким образом, полностью безэлектродной такую систему назвать нельзя (присутствует электрод-датчик в ЛЖ и традиционный ЭКС для ПЖ), но венозный провод к ЛЖ отсутствует. Клинические исследования БЭС-СРТ показали улучшение сократимости сердца у пациентов с безуспешной стандартной СРТ, хотя и выявили ряд технических сложностей (процедура имплантации достаточно сложна, возможны осложнения, как при катетеризации ЛЖ) [24]. В перспективе объединение этой концепции с «безэлектродным» подходом может дать полностью безэлектродную СРТ: например, установка *Micra AV* в правый желудочек для стимуляции ПЖ + синхронизированная БЭС-капсула в ЛЖ вместо электрода. В отдельных экспе-

риментальных работах и клинических случаях уже описана успешная синхронная безэлектродная стимуляция двух желудочков комбинацией доступных устройств [25]. Полноценная же система БЭС-СРТ может появиться, если разработают двухжелудочковый пейсмейкер (например, пару модулей в оба желудочка, работающих синхронно). Пока таких систем нет, но учитывая быстрый прогресс (уже освоены двухкамерные и модули для дефибрилляторов), можно ожидать в будущем и решений для ресинхронизации без проводов.

Самозарядка и энергообеспечение. Одним из ограничений всех имплантируемых устройств остается конечный срок службы батареи. Для безэлектродных кардиостимуляторов эта проблема даже острее, так как замена батареи равнозначна новой процедуре имплантации. Поэтому ведутся исследования способов самообеспечения энергией или дистанционной подзарядки кардиостимуляторов. Один из перспективных подходов – использование энергии движения сердца для генерации электричества. Создаются микроэнергетические генераторы, позволяющие преобразовывать кинетическую энергию сердечных сокращений или кровотока в электрическую (например, пьезоэлектрические и трибоэлектрические наногенераторы) [26, 27]. В эксперименте на животных продемонстрировано, что прикрепленный к миокарду мини-генератор может вырабатывать достаточную энергию для питания простого стимулятора, используя каждое сокращение сердца как источник импульса [26]. В одной из работ 2019 г. описан прототип «симбиотического» кардиостимулятора, полностью питавшегося от колебаний давления в грудной клетке и движений сердца у свиньи, поддерживая при этом заданную частоту стимуляции [26]. Другая группа исследователей создала крошечный электромагнитный генератор, помещаемый эндокардиально, который при каждом ударе сердца генерирует ток за счет колебания магнита в катушке [27]. Такие технологии пока далеки от клинического применения, но концептуально они могут продлить жизнь батареи или даже полностью заменить ее, сделав устройство «вечным» в пределах срока службы электронных компонентов. Помимо механической энергии рассматриваются варианты безэлектродной подзарядки от внешнего излучателя (например, через трансдермальную индукцию, как у некоторых имплантируемых насосов), однако для микро-

пейсмейкеров это затруднительно из-за их малого размера и отсутствия постоянного положения близко к коже. Вероятно, первые практические реализации самозарядки будут гибридными: частичное восполнение заряда от движений сердца продлит интервал между заменами устройства. Пока же в современных безэлектродных стимуляторах применяются максимально емкие батареи специализированного химического состава, оптимизированы алгоритмы экономии заряда (например, специальный экономичный режим телеметрии устройства Micra для снижения расхода батареи при радиосвязи) [4]. Эти меры уже позволяют достичь 10+ лет работы. Дальнейший прогресс в материаловедении и нанотехнологиях, несомненно, найдет применение и в кардиостимуляции.

Особенности применения безэлектродных кардиостимуляторов у разных групп пациентов

Дети и молодые пациенты. Применение постоянной кардиостимуляции у детей – особая область, в которой учитывают рост организма и врожденные пороки сердца. Традиционно детям (особенно маловесным) предпочитают устанавливать эпикардиальные стимуляторы, чтобы избежать повреждения вен и клапанов. Безэлектродные стимуляторы, учитывая их размер (~2–3 см), изначально предназначались для взрослых. Тем не менее уже есть опыт использования Micra у подростков и даже детей младшего возраста в исключительных случаях. В международном регистре, собранном Обществом по стимуляции в педиатрии (PACES), сообщается об имплантации Micra у 63 пациентов в возрасте до 21 года (средний возраст 15 лет) [16]. Имплантация оказалась успешной у 98% детей, при этом 32% имели сложные врожденные пороки сердца [16]. В 12,6% случаев из-за малого размера пациента врачи выбирали доступ через внутреннюю яремную вену (чтобы путь до сердца был короче и чтобы избежать изгибов в нижней полости вены) [16]. За средний период наблюдения ~9,5 мес осложнения возникли у 16% пациентов, что несколько больше, чем у взрослых; отмечены перфорация сердца (n=1), тромбоз бедренной вены (n=1), а также необходимость извлечения и замены устройства у одного пациента из-за неприемлемого порога стимуляции [16]. Отдельно сообщалось об имплантации системы AVEIR у 10 молодых пациентов (≤ 21 года): во всех слу-

чаях устройства успешно установлены (причем 90% через яремный доступ), без осложнений в наблюдении; по расчетам, ввиду редкого использования (интермиттирующая АВ-блокада) батареи этих устройств могли прослужить ~20–25 лет [16]. Эти данные обнадеживают, однако следует учитывать, что у детей и подростков требования к стимуляции могут отличаться. Во-первых, у маленьких пациентов часто показана двухкамерная стимуляция (например, при врожденной полной АВ-блокаде), а однокамерное устройство Micra в таких случаях дает субоптимальный результат. Во-вторых, рост сердца и организма: хотя сам стимулятор мал, по мере роста ребенка его положение относительно сердечных структур может измениться, и долгосрочное влияние устройства на развивающееся сердце еще изучается. Тем не менее эксперты сходятся во мнении, что безэлектродные системы могут быть разумной альтернативой у некоторых детей – в первую очередь тех, у кого уже имеются проблемы с электродами (тромбозы вен, инфекции) или когда установка эпикардиальных электродов сопряжена с риском [15, 16]. В будущих рекомендациях, возможно, появится отдельное упоминание о безэлектродных стимуляторах в педиатрии, но пока они используются off-label, и каждый случай обсуждается коллегиально. Что касается молодых взрослых (20–40 лет), то они вполне могут быть кандидатами на имплантацию Micra/AVEIR при соответствующих показаниях. Анализ мирового опыта показал: несмотря на теоретические преимущества (нет рубца, нет проводов на десятилетия вперед), молодым пациентам реже имплантировали безэлектродные приборы – средний возраст пациентов в исследованиях ~75 лет [16]. Вероятно, кардиологи настороженно относились к идее оставить устройство без возможности замены на столь длительный срок. Однако накопленные данные (порядка сотни имплантаций у пациентов до 50 лет) не показали ухудшения результатов по сравнению с пожилыми: частота успешной имплантации и осложнений сопоставима [16]. При более молодом возрасте зачастую и потребность в стимуляции ниже (например, у некоторых пациентов – редкие паузы или нейрокардиогенные синкопе), поэтому ресурс батареи расходуется медленнее. В совокупности молодые пациенты получают преимущество – отсутствие шрама и инородных материалов в венах, но вопрос долгосрочной перспективы (замены через 10–15 лет) остается

открытым. Одним из подходов может быть плановая экстракция старого устройства при износе и имплантация нового на то же место, что предотвращает скопление нескольких капсул в сердце за десятилетия – эта тактика требует уверенности в безопасности удаления устройств спустя длительное время, и исследования в этом направлении продолжаются [17, 28, 29].

Пациенты пожилого и старческого возраста. Средний возраст пациента для имплантации традиционного кардиостимулятора – около 75 лет, поскольку основные показания (АВ-блокада, фибрилляция предсердий с медленным ритмом) чаще встречаются у лиц старшего возраста. Именно эти пациенты в первых исследованиях и получали безэлектродные стимуляторы: средний возраст в исследованиях Micra и Nanostim также составили ~75 лет [5, 8]. Для пожилых людей отсутствие необходимости в хирургическом разрезе и снижение риска инфекции особенно актуально, так как у них хуже заживают раны и чаще имеется сопутствующая патология (диабет, хроническая болезнь почек). Опыт применения Micra у пациентов ≥80 лет показал, что процедура столь же эффективна, как и у более молодых: успешность ~99%, осложнения минимальны [15]. Отмечено, что у очень пожилых лиц (80–90 лет) несколько чаще возникают транзиторные осложнения, связанные с сосудистым доступом (гематомы в паху, псевдоаневризмы), что объясняется возрастными изменениями сосудов и часто осуществляемой антикоагулянтной терапией [15]. Однако общая переносимость процедуры хорошая, и большинство таких пациентов выписываются уже через 1–2 дня. В исследовании, посвященном именно пожилым (средний возраст 83 года), не было зарегистрировано ни одной смерти или тампонады, связанной с имплантацией устройства Micra, хотя у 4% пациентов отмечены незначительные сосудистые осложнения, не потребовавшие хирургической коррекции [15]. Сравнение с контрольной группой традиционных ЭКС показало преимущество «безэлектродного» подхода у пожилых пациентов – снижение частоты осложнений (ложа и инфекции) [7]. Таким образом, фраза «никогда не поздно для новшества» применима и к безэлектродной стимуляции: даже пациентам старших возрастных групп технология приносит пользу, уменьшая операционную травму и риск. Более того, у очень старых и «хрупких» больных, которым из-за сопутствующих болез-

ней противопоказана обычная операция по имплантации ЭКС (например, тяжелая коагулопатия, высокий риск инфекции), безэлектродное устройство может стать единственным выходом, так как его установка быстрее и менее инвазивна. Практика показывает, что даже в 90-летнем возрасте устройства Micra успешно имплантируются и обеспечивают в оставшиеся годы жизни ритмичную работу сердца [15]. Конечно, выбор должен быть индивидуальным: если у пожилого пациента имеются показания к двухкамерной стимуляции для улучшения гемодинамики, возможно, лучше имплантировать традиционный двухкамерный ЭКС, чем однокамерный безэлектродный стимулятор, чтобы не усугублять сердечную недостаточность. В будущем, с появлением безэлектродных DDD-систем, эта дилемма будет снята [14, 29, 30].

Больные с повышенным риском осложнений. Существует контингент пациентов, у которых традиционный кардиостимулятор сопряжен с заведомо высоким риском проблем. К ним относятся следующие группы.

– Пациенты с анамнезом инфекции кардиостимуляторов. Повторное инфицирование после лечения первой инфекции не редкость, особенно если необходимо повторно имплантировать систему в прежнее или другое место с новыми электродами. «Безэлектродный» подход здесь особенно целесообразен: отсутствие подкожного ложа и минимальная площадь устройства уменьшают риск колонизации бактериями. Клинические примеры показывают, что после удаления инфицированного ЭКС и санации имплантация Micra позволяла безопасно восстановить стимуляцию, не приводя к рецидиву инфекции [7]. Европейские рекомендации уже упоминают, что у пациентов после эндокардита на электроде безэлектродной стимулятор может быть методом выбора после курса лечения, чтобы избежать повторного контакта с инфицированными зонами [7].

– Пациенты с ограниченным венозным доступом. Если у больного окклюзированы центральные вены (например, после длительной катетеризации, гемодиализа или множественных операций на сердце), проведение нового электрода затруднено или невыполнимо. Раньше таким людям либо устанавливали эпикардиальные стимуляторы (через торакотомию), либо старались реканализировать сосуды, что рискованно. Стимулятор сразу решает проблему – венозный

доступ не нужен. Аналогично, при наличии механического трикуспидального клапана: обычный эндокардиальный электрод через него провести невозможно (риск повреждения клапана), а устройство Micra можно без риска имплантировать в правый желудочек через венозный доступ, не касаясь протеза.

– Пациенты с высоким риском тромбообразования. Длинные электроды в венах и сердце могут способствовать тромбозам, особенно у пациентов с тромбофилией, онкологией или при необходимости длительной иммобилизации. Миниатюрный стимулятор внутри сердца имеет существенно меньшую площадь контакта с кровью. В исследованиях отмечено, что частота тромбоэмболических осложнений при использовании Micra крайне низка; даже образование тромбов на устройстве – казуистика (описаны единичные случаи пристеночного тромба, успешно излечены антикоагулянтами) [8]. Таким образом, для пациентов, склонных к тромбозам, безэлектродная система более безопасна, хотя все равно рекомендуется проводить антикоагуляцию по стандартным показаниям (например, при фибрилляции предсердий).

– Пациенты, ведущие активный образ жизни, или спортсмены. Существенный фактор: у физически активных людей могут случаться переломы или смещения электродов при травмах, резких движениях руки (для проводов через подключичную вену). Капсульный стимулятор исключает такие ситуации – его нельзя повредить движением руки или поднятием тяжестей. Кроме того, отсутствие устройства под кожей избавляет от неудобств при занятиях спортом, место не натирается ремнями, не травмируется при ударах. Такие пациенты субъективно очень удовлетворены переходом на безэлектродную систему [18].

Разумеется, каждый случай следует рассматривать индивидуально. Например, если у пациента существует высокий риск инфекции, но ему нужна ресинхронизирующая терапия, пока нельзя предложить безэлектродную СРТ, и придется имплантировать традиционную систему, возможно с профилактическими мерами (антибиотики, экстракция электродов при малейших признаках инфекции и пр.). Тем не менее расширение возможностей «безэлектродного» подхода уже сейчас позволяет многим сложным пациентам обеспечить безопасную стимуляцию без осложнений.

Эффективность, безопасность и экономические аспекты

Эффективность и клинические исходы.

В многочисленных исследованиях показано, что безэлектродные кардиостимуляторы надежно выполняют свою основную функцию – поддержание ритма. Острый и хронический пороги стимуляции у Micra и других устройств находятся на низком уровне (обычно <1 В при импульсе 0,24 мс), а амплитуда сигналов ЭКС (чувствительность) – высокая благодаря вентриполостному расположению электрода [8, 9]. Эти показатели сопоставимы или лучше, чем у трансвенозных систем, и сохраняются стабильными в течение нескольких лет наблюдения [9]. Процент стимуляции зависит от показаний: у части пациентов с интермиттирующими блокадами устройство работает лишь несколько процентов времени, в то время как при хронической блокаде – практически на 100%. Анализ подгрупп показал, что эффективность (процент времени в нужном режиме, предотвращение пауз) аналогична таковой стандартных ЭКС [8]. Важный нюанс – система Micra AV, хоть и не заменяет полноценный двухкамерный ЭКС, все же улучшает гемодинамику у пациентов с АВ-блокадой за счет хотя бы частичной синхронности. В исследованиях MARVEL примерно у 70–80% пациентов с имплантированной системой Micra AV удавалось добиться проведения предсердных сигналов к желудочку в значительной части циклов, что приводило к повышению сердечного выброса и толерантности к нагрузке по сравнению с несинхронной VVI-стимуляцией [10]. Таким образом, даже невысокая эффективность АВ-синхронизации дает клинический эффект.

Что касается качества жизни и симптомов, пациенты с безэлектродным устройством не испытывают дискомфорта, связанного с генератором или электродами. В опросах они отмечают отсутствие ограничений движений руки (какие бывают при подключичной имплантации), психологическую уверенность из-за низкого риска видимых осложнений и удовлетворены косметическим результатом [18]. Объективно, тесты с шестиминутной ходьбой и опросники не выявили снижения толерантности к нагрузке или ухудшения состояния у пациентов с Micra по сравнению с обычным ЭКС [8, 31, 32].

Показатели безопасности. Безопасность безэлектродных стимуляторов оценивалась как в рандомизированных исследованиях, так и в ре-

альной практике. Совокупные данные подтверждают снижение общей частоты осложнений примерно на 40–50% по сравнению с транскатетерными системами [8, 18]. Например, метаанализ 2023 г. (J. Shtembari et al.) показал, что относительный риск осложнений при использовании безэлектродных устройств был на 42% ниже, чем при классических стимуляторах, главным образом за счет отсутствия проблем с ложем ЭКС и электродами [8]. Интересно, что даже такой аспект, как необходимость повторных госпитализаций, снижается: меньшему числу пациентов с Micra требуется незапланированное вмешательство или лечение осложнений в первый год после имплантации, чем среди пациентов с обычными ЭКС [9]. Основные неблагоприятные события при безэлектродной стимуляции приходятся на сам момент процедуры: перфорация миокарда с тампонадой, эмболизация устройства (например, отрыв в легочную артерию) или выраженные сосудистые осложнения бедренного доступа. В регистре Micra частота тампонады, требовавшей дренирования, составила 1,1%, эмболии устройства ~0,1–0,2% (в редких случаях потребовалась хирургическая экстракция из легочной артерии) [8]. Разработка шкалы риска позволила идентифицировать факторы, повышающие риск перфорации при имплантации Micra: женский пол, небольшие размеры сердца, хроническая терапия стероидами и др. – при их наличии оператору нужно особенно тщательно контролировать процесс [19]. После выписки основным потенциально опасным сценарием остается истощение батареи и необходимость ее замены: если не предпринять должных мер, пациент может остаться без стимуляции. Впрочем, современные устройства позволяют заранее предупредить (через телемониторинг) о приближении конца работы, и врач успеет спланировать имплантацию нового стимулятора. Отдельно следует упомянуть безопасность устройств в отношении клапанной функции и риска кардиомиопатии. Постоянная стимуляция правого желудочка (неважно, проводная или безэлектродная) может вызывать диссинхронии и приводить к снижению фракции выброса левого желудочка (так называемая стимулятор-индуцированная кардиомиопатия). Наблюдения за пациентами с безэлектродными кардиостимуляторами в течение 1–2 лет не выявили большей частоты ухудшения сократимости, чем при традиционных стимуляторах [14]. То

есть проблема десинхронизации остается общей для обоих типов – решить ее может только физиологическая стимуляция (например, через пучок Гиса или ресинхронизация), что пока недоступно для безэлектродных устройств, но работы над этим ведутся. Кроме того, как уже было отмечено, отсутствие электрода через трикуспидальный клапан предохраняет от индуцированной регургитации, и исследования с эхокардиографией показывают стабильность функционирования клапана у пациентов с безэлектродными стимуляторами [19].

Экономические аспекты. Первичные затраты на безэлектродную кардиостимуляцию выше, чем на обычную. Сами устройства Micra и AVEIR стоят существенно дороже традиционных ЭКС (в разы), плюс необходимы специальный интродьюсер и катетер. Однако экономический анализ должен учитывать и стоимость осложнений. Одно осложнение, например, инфекция ложа с эндокардитом, ведет к множеству затрат: госпитализация в стационар, антибактериальная терапия, операция по удалению системы, установка нового устройства и длительное наблюдение. Исследование французских экономистов (N. Clementy et al., 2019) показало, что пациенты с осложнениями кардиостимулятора увеличивают расходы системы здравоохранения на 84% в течение 3-летнего периода по сравнению с теми, у кого осложнений нет [18]. Если безэлектродной стимулятор предотвращает даже часть подобных событий, он может окупить свою цену. Моделирование, проведенное в Европе, позволило предположить, что при снижении частоты осложнений примерно на 50% «безэлектродный» подход станет экономически эффективным для группы пациентов с высоким риском (например, при наличии нескольких факторов: пожилой возраст, диабет, хроническая почечная недостаточность, история инфекции устройства) [7, 18]. То есть экономически оправданно заплатить больше за устройство тому пациенту, у которого велика вероятность дорогого осложнения при использовании обычного ЭКС. Для пациентов же с низким риском, с «простыми» показаниями традиционный стимулятор пока предпочтительнее в финансовом плане. Следует также учесть, что если через 8–10 лет пациенту с безэлектродным устройством потребуется новый ЭКС, то суммарные затраты удваиваются (два устройства за 20 лет вместо одной системы с заменой генератора). Тем не менее цены на но-

вую технологию имеют тенденцию к снижению с массовым производством, а опыт уменьшает стоимость лечения осложнений. Кроме прямых затрат, есть еще и социально-экономические: более быстрое возвращение пациента к активности, меньшее количество пропусков работы, более низкие затраты на уход при отсутствии осложнений. Эти нематериальные аспекты, несомненно, также склоняют весы в пользу технологий, повышающих безопасность. В обозримом будущем, с распространением конкуренции на рынке безэлектродных пейсмейкеров и локальным производством, цены на такие устройства могут сравняться с таковыми на традиционные устройства, что устранил финансовый барьер.

Таким образом, экономическая целесообразность безэлектродной стимуляции зависит от конкретной клинической ситуации. Уже сейчас для ряда пациентов (высокий риск инфекций или осложнений) она представляется рациональной, несмотря на цену устройства. В других случаях решение принимается индивидуально, учитывая и медицинские, и финансовые факторы.

Заключение

Безэлектродная кардиостимуляция за относительно короткое время прошла путь от экспериментальной идеи до общепринятой клинической практики, продемонстрировав высокую эффективность и существенные преимущества в безопасности. Современные безэлектродные кардиостимуляторы (Micra, AVEIR) обеспечивают надежную однокамерную стимуляцию сердца, устраняя риски, связанные с электродами и хирургическим ложем: инфекции, механические поломки, повреждение сосудов и клапанов. Клинические исследования и накопленный опыт подтверждают меньшую частоту осложнений по сравнению с традиционными системами, особенно у пациентов с предрасположенностью к инфекциям или проблемами с венозным доступом. При этом гемодинамическая эффективность стимуляции сохраняется на уровне, сопоставимом с таковой обычных ЭКС, а у некоторых категорий (например, пациенты с АВ-блокадой и сохраненным синусовым ритмом) появилась возможность частично реализовать АВ-синхронность благодаря устройствам типа Micra AV.

Развитие технологии продолжается: на пороге широкого применения находятся двухкамерные безэлектродные системы, способные обеспечить полноценную последовательную

стимуляцию предсердий и желудочков, что устранил текущие ограничения «безэлектродного» подхода и позволит охватить более широкий круг пациентов. Параллельно ведутся работы по интеграции безэлектродных стимуляторов с подкожными дефибрилляторами, что в перспективе даст полностью безэлектродной комплекс для лечения бради- и тахиаритмий. Инновационные направления включают создание методов самозарядки имплантатов, чтобы решить проблему ограниченного срока службы батареи. Все это способствует тому, что область безэлектродной кардиостимуляции становится одной из самых динамично развивающихся в современной кардиологии.

Следует подчеркнуть, что выбор типа кардиостимулятора должен быть персонализирован. Безэлектродные устройства уже сейчас оптимальны для пациентов, которым нужна только желудочковая стимуляция, особенно при повышенном риске осложнений от проводных систем. У других больных, которым требуется сложная стимуляция (двухкамерная, ресинхронизирующая) или одновременная дефибрилляция, пока применяются традиционные системы, хотя горизонт планирования для них может измениться в ближайшие годы. Очень важно продолжать сбор данных о долгосрочной работе безэлектродных пейсмейкеров, особенно в контексте многократных имплантаций у молодых пациентов и возможного накопления «старых» устройств в сердце. Также необходимы дальнейшие сравнительные исследования стоимости и результатов, чтобы определить категории пациентов, у которых новый подход дает максимальную эффективность [33].

Безэлектродная кардиостимуляция зарекомендовала себя как безопасный и эффективный метод лечения нарушений ритма сердца. Она дополняет, а в определенных случаях и превосходит традиционную технологию, прокладывая путь к полностью безэлектродным кардиологическим имплантатам будущего. Продолжающиеся исследования и технический прогресс, вероятно, устранят оставшиеся ограничения, позволив еще большему числу пациентов избежать инвазивных осложнений и получить эффект от миниатюрных имплантатов, поддерживающих сердце в правильном ритме.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Грантовая поддержка: соглашение № 0508-12/25 от 14.03.2025 г. с АНО «Московский центр инновационных технологий в здравоохранении».

Библиографический список/References

1. Udo E.O., Zuithoff N.P.A., van Hemel N.M. et al. Incidence and predictors of short- and long-term complications in pacemaker therapy: the FOLLOWPACE study. *Heart Rhythm*. 2012; 9 (5): 728–735. DOI: 10.1016/j.hrthm.2011.12.014
2. Kirkfeldt R.E., Johansen J.B., Nohr E.A. et al. Complications after cardiac implantable electronic device implantations: an analysis of a complete, nationwide cohort in Denmark. *Eur. Heart J.* 2014; 35 (18): 1186–1194. DOI: 10.1093/eurheartj/ehf511
3. Tjong F.V.Y., Knops R.E., Udo E.O. et al. Leadless pacemaker versus transvenous single-chamber pacemaker therapy: a propensity score-matched analysis. *Heart Rhythm*. 2018; 15 (10): 1387–1393. DOI: 10.1016/j.hrthm.2018.04.027
4. Saleem-Talib S., Hoevenaars C.P.R., Molitor N. et al. Leadless pacing: a comprehensive review. *Eur. Heart J.* 2025; 46 (21): 1979–1990. DOI: 10.1093/eurheartj/ehaf119
5. Reddy V.Y., Knops R.E., Sperzel J. et al. Permanent leadless cardiac pacing: results of the LEADLESS trial. *Circulation*. 2014; 129 (14): 1466–1471. DOI: 10.1161/CIRCULATION-AHA.113.006987
6. Ngo L., Nour D., Denman R.A. et al. Safety and efficacy of leadless pacemakers: a systematic review and meta-analysis. *J. Am. Heart Assoc.* 2021; 10 (5): e019212. DOI: 10.1161/JAHA.120.019212
7. Boersma L.V., El-Chami M., Steinwender C. et al. Practical considerations, indications, and future perspectives for leadless and extravascular cardiac implantable electronic devices: a position paper by EHRA/HRS/LAQRS/APQRS. *Europace*. 2022; 24 (10): 1691–1708. DOI: 10.1093/europace/euac066
8. Shtembari J., Shrestha D.B., Awal S. et al. Comparative assessment of safety with leadless pacemakers compared to transvenous pacemakers: a systematic review and meta-analysis. *J. Interv. Card. Electrophysiol.* 2023; 66 (10): 2165–2175. DOI: 10.1007/s10840-023-01550-8
9. El-Chami M.F., Garweg C., Clementy N. et al. Leadless pacemakers at 5-year follow-up: the Micra transcatheter pacing system post-approval registry. *Eur. Heart J.* 2024; 45 (13): 1241–1251. DOI: 10.1093/eurheartj/ehae101
10. Steinwender C., Khelae S.K., Garweg C. et al. Atrioventricular synchronous pacing using a leadless ventricular pacemaker: results from the MARVEL 2 study. *JACC Clin. Electrophysiol.* 2020; 6 (1): 94–106. DOI: 10.1016/j.jacep.2019.10.017
11. Shantha G., Brock J., Singleton M.J. et al. A comparative study of the two leadless pacemakers in clinical practice. *J. Cardiovasc. Electrophysiol.* 2023; 34 (8): 1896–1903. DOI: 10.1111/jce.16019
12. Knops R.E., Reddy V.Y., Ip J.E. et al. A dual-chamber leadless pacemaker. *N. Engl. J. Med.* 2023; 388 (25): 2360–2370. DOI: 10.1056/NEJMoa2300080
13. Tam M.T.K., Cheng Y.W., Chan J.Y.S. et al. Aveir VR real-world performance and chronic pacing threshold prediction using mapping and fixation electrical data. *Europace*. 2024; 26 (5): euad051. DOI: 10.1093/europace/ueae051
14. Garweg C., Vandenberk B., Foulon S. et al. Leadless pacing with Micra TPS: a comparison between right ventricular outflow tract, mid-septal, and apical implant sites. *J. Cardiovasc. Electrophysiol.* 2019; 30 (10): 2002–2011. DOI: 10.1111/jce.14083
15. Barletta V., Zucchelli G., Parollo M. et al. Leadless pacing in the elderly: never too old for something new. *Monaldi Arch. Chest. Dis.* 2020; 90 (4): 1255. DOI: 10.4081/monaldi.2020.1255
16. Shah M.J., Borquez A.A., Cortez D. et al. Transcatheter leadless pacing in children: a PACES collaborative study in the real-world setting. *Circ. Arrhythm. Electrophysiol.* 2023; 16 (2): e011447. DOI: 10.1161/CIRCEP.122.011447
17. Reddy V.Y., Miller M.A., Knops R.E. et al. Retrieval of the leadless cardiac pacemaker: a multicenter experience. *Circ. Arrhythm. Electrophysiol.* 2016; 9 (12): e004626. DOI: 10.1161/CIRCEP.116.004626
18. Clementy N., Fernandes J., Carion P.L. et al. Pacemaker complications and costs: a nationwide economic study. *J. Med. Econ.* 2019; 22 (11): 1171–1178. DOI: 10.1080/13696998.2019.1652186
19. Beurskens N.E.G., Tjong F.V.Y., de Bruin-Bon R.H.A. et al. Impact of leadless pacemaker therapy on cardiac and atrioventricular valve function through 12 months of follow-up. *Circ. Arrhythm. Electrophysiol.* 2019; 12 (11): e007124. DOI: 10.1161/CIRCEP.118.007124
20. Knops R.E., Lloyd M.S., Roberts P.R. et al. A modular communicative leadless pacing-defibrillator system. *N. Engl. J. Med.* 2024; 391 (15): 1402–1412. DOI: 10.1056/NEJMoa2401807
21. Fernandez-Palacios G., Garcia-Moran E., Sandin-Fuentes M. et al. The utility of a combined synchronous atrioventricular leadless pacemaker and subcutaneous implantable cardiac defibrillator system in bilateral upper limb venous occlusion. *Europace*. 2021; 23 (5): 814. DOI: 10.1093/europace/ueaa332
22. Nieves J., Laslett D.B., Basil A. et al. Simultaneous leadless pacemaker and subcutaneous ICD implantation with intraoperative screening: workflow in two patients. *JACC Case Rep.* 2022; 4 (19): 101535. DOI: 10.1016/j.jaccas.2022.06.018
23. Auricchio A., Delnoy P.P., Regoli F. et al. First-in-man implantation of leadless ultrasound-based cardiac stimulation pacing system: novel endocardial left ventricular resynchronization therapy in heart failure patients. *Europace*. 2013; 15 (8): 1191–1197. DOI: 10.1093/europace/eut124
24. Wijesuriya N., Elliott M.K., Mehta V. et al. Leadless left ventricular endocardial pacing for cardiac resynchronization therapy: a systematic review and meta-analysis. *Heart Rhythm*. 2022; 19 (7): 1176–1183. DOI: 10.1016/j.hrthm.2022.02.018
25. Carabelli A., Jabeur M., Jacon P. et al. European experience with a first totally leadless cardiac resynchronization therapy pacemaker system. *Europace*. 2021; 23 (5): 740–747. DOI: 10.1093/europace/ueaa342
26. Ouyang H., Liu Z., Li N. et al. Symbiotic cardiac pacemaker. *Nat. Commun.* 2019; 10 (1): 1821. DOI: 10.1038/s41467-019-09851-1
27. Ryu H., Park H.M., Kim M.K. et al. Self-rechargeable cardiac pacemaker system with triboelectric nanogenerators. *Nat. Commun.* 2021; 12 (1): 4374. DOI: 10.1038/s41467-021-24417-w
28. Сергуладзе А.С., Мацонашвили Г.Р., Мацонашвили Т.Р. и др. Хирургическое лечение синдрома слабости синусного узла у пациента после коррекции врожденного порока сердца с аномалией внутригрудного расположения и формирования сердца. *Детские болезни сердца и сосудов*. 2025; 22 (1): 74–80. DOI: 10.24022/1810-0686-2025-22-1-74-80
29. Serguladze A.S., Matsonashvili G.R., Matsonashvili T.R. et al. Surgical treatment of sick sinus syndrome in a patient after congenital heart defect correction with anomaly of intrathoracic

- positioning and heart formation. *Children's Heart and Vascular Diseases*. 2025; 22 (1): 74–80 (in Russ.). DOI: 10.24022/1810-0686-2025-22-1-74-80
29. Сатюкова А.С., Филатов А.Г., Панагов З.Г. и др. Имплантируемые устройства в диагностике нарушений ритма сердца: прошлое, настоящее, будущее. *Анналы аритмологии*. 2024; 21 (2): 83–90. DOI: 10.15275/annaritmol.2024.2.2
Satyukova A.S., Filatov A.G., Panagov Z.G. et al. Implantable devices in the diagnosis of cardiac arrhythmias: past, present, future. *Annaly Aritmologii*. 2024; 21 (2): 83–90 (in Russ.). DOI: 10.15275/annaritmol.2024.2.2
 30. Фролов А.В., Плащинская Л.И., Козлов И.Д. и др. Прогнозирование аппаратной терапии у пациентов с имплантированными кардиовертерами-дефибрилляторами. *Анналы аритмологии*. 2024; 21 (2): 97–104. DOI: 10.15275/annaritmol.2024.2.4
Frolov A.V., Plashchinskaya L.I., Kozlov I.D. et al. Prediction of shock therapy in patients with implanted cardioverter-defibrillators. *Annaly Aritmologii*. 2024; 21 (2): 97–104 (in Russ.). DOI: 10.15275/annaritmol.2024.2.4
 31. Савельева М.А., Степанова В.В., Стовпюк О.Ф. и др. Сердечная ресинхронизирующая терапия у взрослой пациентки со сложным врожденным пороком сердца и длительным стажем постоянной электрокардиостимуляции. *Анналы аритмологии*. 2024; 21 (1): 9–15. DOI: 10.15275/annaritmol.2024.2.1
Savelyeva M.A., Stepanova V.V., Stovpyuk O.F. et al. Cardiac resynchronization therapy in an adult patient with complex congenital heart disease and a long history of permanent cardiac pacing. *Annaly Aritmologii*. 2024; 21 (1): 9–15 (in Russ.). DOI: 10.15275/annaritmol.2024.2.1
 32. Филиппова С.Г., Кваша Б.И., Проничева И.В. и др. Влияние медико-социальных факторов и особенностей медицинской информированности на риск инфекции, ассоциированной с сердечными имплантируемыми электронными устройствами в условиях коморбидности. *Анналы аритмологии*. 2023; 20 (4): 232–248. DOI: 10.15275/annaritmol.2023.4.4
Filippova S.G., Kvasha B.I., Pronicheva I.V. et al. Influence of medical and social factors and features of medical awareness on the infection risk associated with cardiac implantable electronic devices in comorbidity conditions. *Annaly Aritmologii*. 2023; 20 (4): 232–248 (in Russ.). DOI: 10.15275/annaritmol.2023.4.4
 33. Голухова Е.З. Отчет о лечебной и научной работе Национального медицинского исследовательского центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева Минздрава России за 2024 год. Перспективы дальнейшего развития. *Сердечно-сосудистые заболевания. Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН*. 2025; 26 (Спецвыпуск): 5–130. DOI: 10.24022/1810-0694-2025-26S
Golukhova E.Z. Report on the clinical and scientific activity of Bakoulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery for 2024. Development prospects. *The Bulletin of Bakoulev Center. Cardiovascular Diseases*. 2025; 26 (Special Issue) (in Russ.). DOI: 10.24022/1810-0694-2025-26S

Поступила 16.07.2025

Принята к печати 06.08.2025