

<https://doi.org/10.35336/VA-1589>

<https://elibrary.ru/NZCSNK>

ВОЗМОЖНОСТИ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ РЕКУРРЕНТНЫХ  
ЖЕЛУДОЧКОВЫХ НАРУШЕНИЙ РИТМА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

А.В.Мазурок, В.А.Васковский, Н.А.Антипина, А.Ш.Ревিশвили

ФГБУ «НМИЦ хирургии им. А.В.Вишневого» МЗ РФ, Россия, Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27.

*Рассмотрены современные подходы к применению стереотаксической радиохирургии аритмий (STAR) у пациентов с устойчивой желудочковой тахикардией, рефрактерной к медикаментозной терапии и катетерной абляции. Представлены биофизические и молекулярные механизмы терапевтического действия метода, экспериментальные данные, принципы планирования и визуализации мишени, а также международный и собственный опыт клинического применения метода у пациентов с желудочковыми тахикардиями. Отдельно изложены технические аспекты методики, нерешенные вопросы, ограничения и потенциал внедрения STAR в российскую клиническую практику.*

**Ключевые слова:** стереотаксическая радиохирургия аритмий; неинвазивная абляция; радиотерапия сердца; стереотаксическая радиоабляция аритмий; стереотаксическая лучевая терапия тела; рефрактерная желудочковая тахикардия.

**Конфликт интересов:** отсутствует.

**Финансирование:** отсутствует.

**Рукопись получена:** 09.12.2025 **Исправленная версия получена:** 13.03.2026 **Принята к публикации:** 12.05.2026

**Ответственный за переписку:** Мазурок Алина Вадимовна, E-mail: [alvmazurok@mail.ru](mailto:alvmazurok@mail.ru)

А.В.Мазурок - ORCID ID 0000-0001-6032-2130, В.А.Васковский - ORCID ID 0000-0003-3126-7106, Н.А.Антипина - ORCID ID 0000-0002-0731-2141, А.Ш.Ревিশвили - ORCID ID 0000-0003-1791-9163

**Для цитирования:** Мазурок АВ, Васковский ВА, Антипина НА, Ревিশвили АШ. Возможности стереотаксической лучевой терапии для лечения рекуррентных желудочковых нарушений ритма: современное состояние проблемы. *Вестник аритмологии.* 2026;33(2): e12-e30. <https://doi.org/10.35336/VA-1589>.

POSSIBILITIES OF STEREOTACTIC BODY RADIOTHERAPY FOR THE TREATMENT  
OF VENTRICULAR ARRHYTHMIAS. CURRENT STATE OF THE ART

A.V.Mazurok, V.A.Vaskovskiy, N.A.Antipina, A.Sh.Revishvili

A.V.Vishnevskiy NMRC of Surgery of the MH RF, Russia, Moscow, 27 Bolshaya Serpukhovskaya str.

*This review article examines current approaches to the use of Stereotactic Arrhythmia Radioablation (STAR) in patients with sustained ventricular tachycardia refractory to medical therapy and catheter ablation. The biophysical and molecular mechanisms of the therapeutic action of the method, experimental data, principles of target planning and imaging, as well as international and our own clinical experience with the method in patients with ventricular tachycardias are presented. Technical aspects of the method, unresolved issues, limitations, and the potential for implementing STAR into Russian clinical practice are discussed separately.*

**Key words:** stereotactic arrhythmia radioablation; non-invasive ablation; cardiac radiotherapy; stereotactic body radiotherapy; refractory ventricular tachycardia; SBRT; STAR.

**Conflict of Interest:** none.

**Funding:** none.

**Received:** 09.12.2025 **Revision received:** 13.03.2026 **Accepted:** 12.05.2026

**Corresponding Author:** Alina V. Mazurok, E-mail: [alvmazurok@mail.ru](mailto:alvmazurok@mail.ru)

A.V.Mazurok - ORCID ID 0000-0001-6032-2130, V.A.Vaskovskiy - ORCID ID 0000-0003-3126-7106, N.A.Antipina - ORCID ID 0000-0002-0731-2141, A.Sh.Revishvili - ORCID ID 0000-0003-1791-9163

**For citation:** Mazurok AV, Vaskovskiy VA, Antipina NA, Revishvili ASh. Possibilities of stereotactic body radiotherapy for the treatment of ventricular arrhythmias: current state of the art. *Journal of Arrhythmology.* 2026;33(2): e12-e30. <https://doi.org/10.35336/VA-1589>.

Желудочковые тахикардии (ЖТ) - жизнеугрожающие нарушения сердечного ритма, характеризующиеся патологически ускоренной и, как правило, нерегулярной электрической активностью, источник которой находится в миокарде желудочков или в проводящей системе ниже пучка Гиса. При длительной персистенции ЖТ может приводить к гемодинамической нестабильности и остановке сердца [1].

Внезапная сердечная смерть (ВСС) остается одной из ведущих причин летальности в развитых странах: по данным эпидемиологических исследований в США, её ежегодная частота составляет по различным оценкам 185-450 тысяч случаев (7-18% всех случаев смерти) [2]. В большинстве случаев причиной ВСС являются злокачественные желудочковые аритмии - устойчивая ЖТ или фибрилляция желудочков, особенно на фоне структурного поражения миокарда. Так, по данным 2023 года в РФ операции при желудочковых аритмиях проведены у 5369 пациентов, методом эндоваскулярной деструкции субстрата аритмий в 3578 случаях, 1791 пациенту имплантированы антиаритмические устройства. У 9,6% пациентов катетерные процедуры выполнялись повторно [3].

На сегодняшний день основными методами лечения ЖТ являются медикаментозная терапия, имплантация кардиовертеров-дефибрилляторов (ИКД) и катетерная абляция. Имплантируемые устройства эффективно предотвращают ВСС, обеспечивая своевременное купирование жизнеугрожающих аритмий посредством антитахикардической стимуляции либо электрической дефибрилляции. Однако множественные срабатывания ИКД, особенно при частых эпизодах ЖТ, ассоциируются с выраженным снижением качества жизни, увеличением тревожности и депрессии у пациентов, а также с ухудшением прогноза сердечной недостаточности [4].

Катетерная абляция ЖТ позволяет добиться устойчивого контроля аритмии у значительного числа пациентов. Тем не менее, её результативность снижается в случаях глубокого интрамурального или субэпикардального расположения очага, наличия выраженного рубцово-изменённого миокарда, а также при повторных катетерных абляциях. По данным литературы, частота рецидивов ЖТ после абляции может достигать 20-50%, что нередко требует многократных повторных вмешательств. Более того, ряд пациентов изначально не являются кандидатами для проведения абляции в силу тяжёлой соматической коморбидности, нестабильной гемодинамики либо низкой сократительной функции миокарда [5].

Особую проблему представляют случаи, когда ЖТ не купируется или рецидивирует даже после проведённых абляций, либо когда выполнение абляции затруднительно ввиду анатомических особенностей (большая площадь постинфарктного рубца, распространение субстрата аритмии на интрамуральную и эпикардальную поверхности сердца и т.п.) [6]. В этой связи увеличивается интерес к неинвазивным методам лечения, способным восполнить недостатки традиционных подходов [7-9]. Сохраняется клиническая потребность в альтернативных методах терапии для

пациентов с рефрактерной или рецидивирующей ЖТ, при которой стандартные подходы оказываются неэффективными или неприменимыми, что обуславливает актуальность поиска новых методик и подходов при лечении таких пациентов [5, 10, 11].

Так, одним из наиболее перспективных направлений становится стереотаксическая радиоабляция аритмий (stereotactic arrhythmia radioablation, STAR), которая привлекает всё больше внимания как потенциальная неинвазивная альтернатива при ограниченных возможностях инвазивного лечения. На сегодняшний день по результатам поиска в базе PubMed по запросу «stereotactic arrhythmia radioablation» наблюдается устойчивый рост числа научных публикаций: с 24 статей в 2021 году до 126 статей к 2025, что отражает возросший интерес исследователей к технологии STAR.

Методика STAR подразумевает однократное прицельное облучение аритмогенного субстрата высокими дозами ионизирующего излучения [12, 13]. Этот подход основан на принципах стереотаксической лучевой терапии тела (stereotactic body radiation therapy - SBRT), которая широко применяется в онкологической практике, включая лечение локализованных опухолей лёгких, печени и олигометастазов [14-16]. Качество и эффективность реализации STAR определяются консенсусными техническими требованиями, изначально выработанными для стереотаксической радиотерапии в онкологии. Накопленный опыт высокодозного облучения органов грудной клетки, включая структуры сердца, позволил адаптировать методику для лечения аритмий и послужил основой первых экспериментов по применению лучевой терапии в аритмологии [17, 18].

Первые клинические результаты применения STAR оказались обнадеживающими, продемонстрировав выраженное снижение частоты аритмий у пациентов с рефрактерными ЖТ [19, 20]. В рамках систематического обзора было показано, что метод обеспечивает снижение количества эпизодов ЖТ более чем на 85% при приемлемом профиле безопасности у более чем 40 пациентов, демонстрируя высокую эффективность у пациентов с рефрактерными ЖТ, не поддающимися стандартным методам лечения [21-23]. Эти данные способствовали дальнейшему развитию метода: количество выполненных процедур STAR значительно возросло, а число публикаций, включающих клинические случаи, небольшие серии наблюдений и проспективные исследования - увеличилось. На сегодняшний день продолжается активное проведение клинических исследований, направленных на изучение эффективности и переносимости STAR. При этом биологические механизмы её терапевтического воздействия остаются предметом научных дискуссий.

В настоящем обзоре используются несколько терминов, отражающих различные исторически сложившиеся подходы к обозначению метода. Термин «стереотаксическая радиохирургия аритмий» подчёркивает однофракционный характер вмешательства и соответствует концепции радиохирургии как однократного высокодозного облучения с высокой геометрической точностью. Понятие «радиоабляция» акцентирует не столько технические параметры

доставки излучения, сколько биологическую цель воздействия - формирование контролируемого радиационного повреждения аритмогенного субстрата. Термин SBRT (stereotactic body radiation therapy) сформировался в онкологической радиотерапии и используется для обозначения высокоточного гиподракционированного облучения. Аббревиатура STAR (stereotactic arrhythmia radioablation) введена группой авторов под руководством P.Cuculich и P.Robinson и на сегодняшний день является наиболее распространённым специфическим обозначением метода в аритмологической литературе. В настоящем обзоре в качестве основного используется термин «стереотаксическая радиоабляция аритмий (STAR)».

Цель обзора - систематизировать и проанализировать современные научные и клинические данные о применении STAR в лечении ЖТ, устойчивых к традиционным методам терапии.

Настоящий обзор основан на структурированном анализе современной литературы, посвящённой применению STAR при устойчивой ЖТ. Поиск публикаций осуществлялся в базах данных PubMed и Scopus с использованием ключевых слов на английском языке: "stereotactic arrhythmia radioablation", "STAR", "ventricular tachycardia", "cardiac radioablation", "SBRT", "non-invasive VT ablation". По результатам поиска было идентифицировано более 200 публикаций.

В анализ включались публикации 2020-2025 гг. на английском или русском языках, включая проспективные клинические исследования, когортные серии, систематические обзоры и мета-анализы, доклинические экспериментальные работы, а также клинические рекомендации и консенсусные документы. Рассматривались исследования, в которых популяцию составляли пациенты с устойчивой ЖТ, рефрактерной к медикаментозной терапии и/или катетерной абляции. Оценивались клинические исходы, включая частоту рецидивов ЖТ, безопасность и частоту осложнений, общую выживаемость.

Исключались публикации на языках, отличных от английского и русского, материалы конференций без полного текста, описания отдельных клинических случаев (n=1), а также дублирующие публикации одних и тех же когорт. Ввиду описательного характера обзора формальная схема отбора по PRISMA не составлялась. Отбор публикаций осуществлялся двумя независимыми авторами на основании соответствия критериям включения; разногласия разрешались путём обсуждения. В итоговый анализ вошло 99 источников. Собственные клинические наблюдения авторов не входили в литературный поиск и представлены отдельным разделом в качестве иллюстративного материала.

## ПАТОФИЗИОЛОГИЯ ЛУЧЕВОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ МИОКАРДА

Патофизиологическая основа электронно-лучевого повреждения миокарда при STAR включает несколько механизмов. Воздействие ионизирующего излучения на аритмогенный субстрат приводит к структурным и функциональным изменениям, способ-

ствующим подавлению патологической электрической активности. К ключевым механизмам относятся развитие радиоиндуцированного фиброза и молекулярная перестройка компонентов проводящей системы. В совокупности эти процессы формируют зону изменённой электрической проводимости, нарушающую устойчивость re-entry контуров и снижающую вероятность рецидива аритмии.

Предполагалось, что антиаритмическое действие STAR обусловлено индукцией апоптоза и последующим фиброзом в аритмогенной сердечной ткани. Однако накопленные данные доклинических и клинических исследований свидетельствуют о более сложном, многофакторном ответе миокарда на ионизирующее излучение. Один из основных эффектов - развитие радиационно-индуцированного фиброза, запускаемого через механизмы оксидативного стресса, повреждение микрососудов, воспалительную инфильтрацию и активацию миофибробластов [24]. Фиброзная трансформация электроизолирует патологические пути re-entry аналогично цели катетерной абляции. Однако клинический эффект STAR иногда наступает значительно раньше формирования зрелого фиброза (который обычно формируется  $\geq 6$  месяцев), что указывает на наличие дополнительных негистологических механизмов действия.

Исследование D.M.Zhang и соавт. (2021) расширило представления о механизмах действия STAR, показав, что наряду с фиброзом ключевую роль могут играть молекулярные изменения - в частности, ремодуляция межклеточных контактов и повышение экспрессии коннексинов [25]. Облучение прилежащих к рубцу участков миокарда способствовало увеличению экспрессии натриевого канала Nav1.5 и белка коннексина-43 (Cx43). Предполагается, что важную роль в активации Nav1.5 играет сигнальный путь Notch, запускаемый в ответ на радиационное воздействие. Таким образом, радиотерапевтическое воздействие может вызывать электрофизиологическую перестройку проводящей системы сердца, открывая новые возможности неинвазивного воздействия на аритмогенные зоны ЖТ. В том же исследовании представлены патоморфологические данные четырёх пациентов (после трансплантации сердца, либо аутопсии в промежутке 17-478 дней после облучения), которые подтвердили отсутствие выраженного фиброза миокарда после однократного облучения в дозе 25 Гр. Несмотря на это, у данных пациентов наблюдалось значительное снижение частоты эпизодов ЖТ, что подчёркивает клиническую значимость альтернативных механизмов, не связанных с формированием фиброза [25].

Помимо этого, исследования M.Amino и соавт. продемонстрировали, что облучение сердца способно повышать экспрессию коннексина-43 - трансмембранного белка, обеспечивающего электрическую связь между кардиомиоцитами. Увеличение уровня Cx43 наблюдалось как в зоне облучения, так и за её пределами; причём характер эффекта варьировал в зависимости от вида излучения (фотонное, протонное или ионы углерода) [26]. Также сообщается, что снижение митохондриальной плотности, наблюдаемое после облучения,

способствует более эффективной передаче кальциевого сигнала внутри кардиомиоцита, что может рассматриваться как потенциально новый механизм радиотерапевтического воздействия [27].

#### **Связь между механизмами ЖТ и рубцом миокарда**

ЖТ, развивающаяся на фоне структурных заболеваний сердца, преимущественно связана с механизмом повторного входа возбуждения (re-entry), формирующимся в участках фиброзно-изменённого миокарда. Такие изменения, как правило, возникают после инфаркта миокарда, воспалительных или инфильтративных процессов, а также после перенесённых кардиохирургических операций.

При ишемической кардиомиопатии зоны рубцевания, как правило, следуют анатомии коронарного кровотока и преобладают в субэндокардиальных слоях, иногда распространяясь на всю толщину миокарда. В случае неишемической кардиомиопатии рубцовая трансформация может носить более разнообразный характер - затрагивая эндокардиальные, интрамуральные или субэпикардиальные отделы с очаговым либо диффузным распределением [24, 28]. Наиболее значимыми зонами для запуска и поддержания re-entry аритмий являются участки замедленного проведения внутри рубцовой ткани. Эти области служат основными ориентирами при выполнении катетерной абляции [29]. Аритмогенный субстрат может располагаться как по эндокардиальной, так и по эпикардиальной поверхности, однако нередко они частично или полностью располагаются в толще миокарда (интрамурально). Это ограничивает возможности картирования только с одной стороны (эпи- и/или эндокардиально) и затрудняет полную анатомическую визуализацию аритмогенного пути. У больных с ЖТ, ассоциированной с рубцовой тканью, программированная стимуляция часто вызывает несколько морфологических вариантов устойчивой мономорфной тахикардии. Это может быть следствием наличия множественных контуров re-entry, повторного входа или разных выходов из одной и той же рубцовой зоны. Так как зона рубца не обязательно является источником аритмии, для эффективного планирования и лечения пациента, критически важна точная локализация и оконтуривание аритмогенных участков миокарда.

#### **Экспериментальные исследования на животных; доклинические исследования**

Первым доклиническим исследованием, положившим начало экспериментальному изучению метода, стала работа A.Sharma и соавт. (2010). С помощью линейного ускорителя CyberKnife авторы выполнили неинвазивную STAR и доказали возможность нанесения прецизионного повреждения в электрофизиологическом субстрате аритмии [30]. В дальнейшем целый ряд экспериментальных исследований был посвящён последствиям применения SBRT на различных моделях: мышах, крысах, кроликах, свиньях и собаках. Целью этих работ была оценка морфофункциональных изменений сердца после однократного облучения, в том числе на фоне индуцированного инфаркта миокарда. Обычно наблюдение продолжалось до 8-10

месяцев, при этом использовались разные типы излучения: фотонного, энергии тяжелых частиц (протон) и тяжелых ионов [31-37].

В большинстве доклинических работ облучению подвергались либо здоровые животные, либо животные после экспериментально-вызванного инфаркта миокарда [25, 34, 35]. Основными мишенями служили легочные вены, атриовентрикулярное (АВ) соединение, cavo-трикуспидальный истмус, а также (реже) миокард стенок желудочков сердца. Как правило, облучение проводилось однократно в пределах 25-40 Гр. Информация о непосредственных острых эффектах лучевого воздействия на сердце ограничена, поскольку значимое угнетение проводимости в области АВ-узла отмечалось только при экстремально высоких дозах ( $\geq 90-160$  Гр), значительно превышающих клинические [35].

#### **Ранние эффекты лучевого повреждения (от двух до шести недель)**

Признаки локального лучевого повреждения миокарда могут проявляться в первые недели после облучения. Например, при локальном  $\beta$ -облучении лёгочных вен (свиньи, 60 Гр) через 2-6 недель гистологически отмечались некроз мышечной стенки вен и разрушение эластических волокон сосудов [38]. В экспериментальной модели инфаркта миокарда у кроликов показано, что уже через 2 недели после облучения тяжёлыми ионами (проведённого на 14-й день после ИМ) в пограничной зоне инфаркта и отдалённых участках миокарда повышается экспрессия коннексина-43 [26]. Это сопровождалось снижением индуцируемости ЖТ и фибрилляции желудочков по сравнению с нелеченой контрольной группой [25]. Аналогично, у мышей после экспериментального инфаркта облучение  $\gamma$ -излучением в дозе 15-25 Гр ускоряло проводимость как в интактном, так и в повреждённом миокарде; эти изменения ассоциировались с усиленной экспрессией натриевых каналов и Sx43 спустя 6 недель после терапии при дозах  $\geq 15$  Гр [25]. Примечательно, что у здоровых кроликов повышенная экспрессия Sx43 после облучения сохранялась до 1 года, тогда как у животных с инфарктом степень этого эффекта была менее выраженной [26].

Исследования на крысах показали наличие отёка, вакуолизации и расширения интеркалярных дисков миоцитов в течение первого месяца после облучения (20-50 Гр). Эти явления усиливались при дозах от 30 Гр и сопровождалось удлинением интервалов PR и QTc, несмотря на отсутствие морфологических признаков некроза, что указывает на участие других механизмов ремодуляции проводимости на ранних этапах [32].

В ряде экспериментов на крупных животных (мини-пиги) с использованием STAR и последующим повторным картированием мишеней (25-196 дней) было показано дозозависимое снижение амплитуды сигнала на картирующих электродах, при электрофизиологической верификации мишеней, выполняемой после воздействия. Минимальная эффективная доза составила  $\geq 25$  Гр. Двухнаправленная блокада cavo-трикуспидального перешейка была достигнута спустя 30 дней при дозе 40 Гр, а полная блокада АВ-соединения - через 49 дней при 70 Гр [30].

### Отдаленные эффекты (3-9 месяцев)

Морфологические изменения сердца вследствие облучения носят ярко выраженный дозозависимый характер. Так, при воздействии  $\beta$ -излучения в дозе 60 Гр на интиму лёгочных вен у свиней наблюдались острые повреждения эндотелия, распад эластических волокон и некроз миокарда, которые в последующие месяцы сменялись развитием выраженного фиброза (в среднем через  $81 \pm 27$  дней) [38]. Отложенное развитие фиброза, вероятно, объясняется комплексом процессов, включая апоптоз и некроз, которые постепенно трансформируются в соединительную ткань. При этом ряд патологических изменений (микрососудистые нарушения, геморрагии, воспалительная инфильтрация, жировая дистрофия) возникают постепенно, начиная примерно с 3-го месяца после облучения [25, 31, 32].

Например, в работе M.Amino показано, что после облучения левого предсердия и устьев лёгочных вен  $\gamma$ -лучами, фиброз миокарда формировался при дозах  $>30$  Гр, тогда как при 20-27,5 Гр через 6 месяцев отмечались лишь слабо выраженные фиброзные изменения [36, 39]. В эксперименте с прицельным протонным облучением АВ узла (40-50 Гр) у свиней регистрировали замедление АВ-проводимости на 10-12 неделе после воздействия, а гистологическое исследование через 3 месяца выявило сочетание участков фиброза и некроза в зоне узла [33].

### Побочные эффекты радиотерапии сердца

Доклинические исследования, главным образом на свиньях, демонстрируют дозозависимую кардиотоксичность стереотаксической радиотерапии. При относительно низких дозах ( $<35$  Гр) отмечаются лишь умеренные неблагоприятные изменения - например, небольшое транзитное снижение сократимости миокарда и ограниченные перикардальные выпоты [32].

Напротив, дозы  $>35$  Гр сопровождаются более тяжёлыми поражениями: развитием выраженных аритмий, острых коронарных событий и внезапной смертью животных, а также повреждением соседних органов. В одном из экспериментов облучение области

сердца дозой 37,5 Гр привело к формированию бронхо-медиастинального свища [39]. Кроме того, прицельное протонное облучение коронарных артерий (до 40 Гр) вызвало острое лучевое повреждение сосудистой стенки с последующей окклюзией просвета [33].

В дополнение к зарубежным данным, отечественной исследовательской группой под руководством А.Ш.Ревитшвили и А.В.Голанова было проведено экспериментальное исследование на модели домашних свиней, направленное на оценку безопасности и эффективности STAR в различных дозовых режимах. Результаты подтвердили высокую точность и конформность дозовой доставки, а также продемонстрировали выраженную дозозависимость терапевтического эффекта (рис. 1). Так, облучение АВ-узла в дозах 40-45 Гр приводило к полной АВ-блокаде III степени (включая случаи летального исхода вследствие асистолии), тогда как 35 Гр не вызвали стойкого нарушения проводимости. Воздействие эквивалентными дозами на миокард предсердий и желудочков вызывало трансмуральные изменения в виде очагового фиброза, кровоизлияний и кальциноза, без вовлечения прилежащих структур. Данные результаты указывают на существование пороговой дозы, необходимой для надёжного электрического эффекта, и одновременно подчёркивают необходимость осторожности при повышении лучевой нагрузки [40].

Несмотря на обнадеживающие результаты, остаются нерешёнными вопросы о длительности клинического эффекта, достаточности выявленных механизмов для объяснения раннего терапевтического ответа, а также о возможности универсального применения STAR при различных этиологиях тахикардий. В этой связи проводится проспективное исследование, направленное на оценку влияния увеличения дозы облучения на эффективность STAR и частоту рецидивов ЖТ [41].

Тем не менее, даже с учётом существующих неопределённостей, в условиях электрического шторма и при отсутствии иных эффективных терапевтических опций метод STAR рассматривается как спасительная

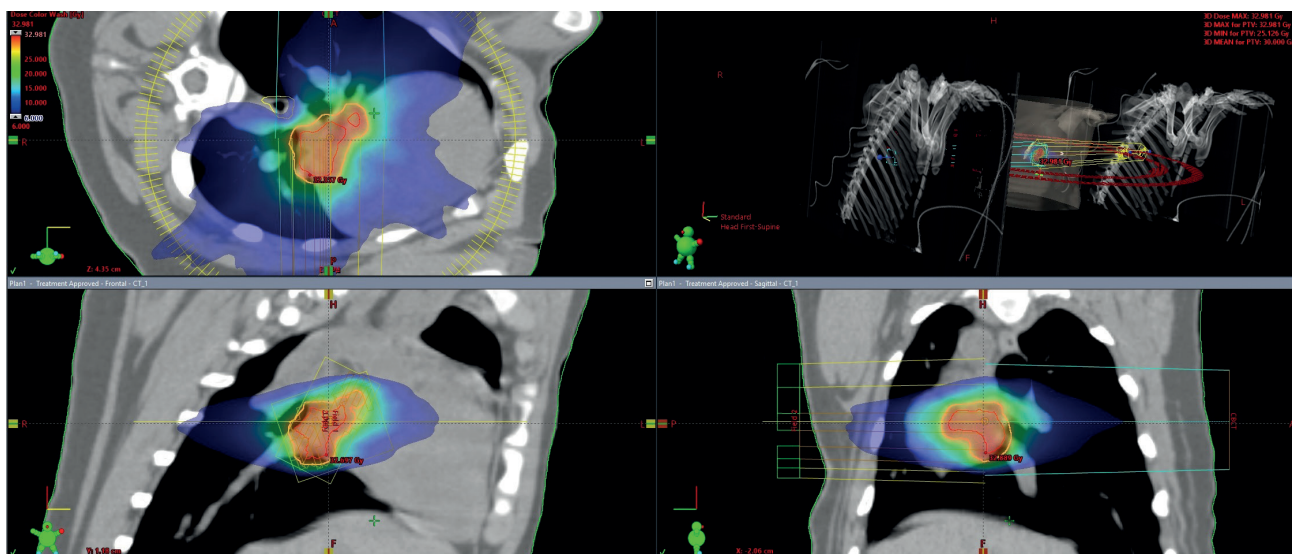


Рис. 1. Визуализация изодозного распределения, проекция области-мишени в области саммита левого желудочка на нативную компьютерную томографию сердца свиньи в системе планирования облучения Precision.

стратегия, способная купировать аритмию и существенно улучшить качество жизни пациента.

## ПРИНЦИПЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ МИШЕНИ ПРИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

### Неинвазивная визуализация субстрата терапии

Методы визуализации играют ключевую роль в планировании STAR, позволяя точно идентифицировать аритмогенные зоны. Наиболее широкое применение получила магнитно-резонансная томография сердца с контрастным усилением гадолинием (LGE-MPT), которая отображает зоны макроскопического фиброза [42-44]. Однако информативность МРТ снижается при наличии имплантированных ИКД и при неишемических кардиомиопатиях. Сравнительные исследования показывают, что LGE-MPT может превосходить инвазивное электрокардиокартирование в выявлении интрамуральных и гетерогенных рубцовых участков, хотя визуализированные зоны фиброза могут содержать жизнеспособные миоциты [45-47].

Радионуклидные методы, такие как позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и как перфузионная однофотонная эмиссионная томография (SPECT), обеспечивают функциональную оценку перфузии и метаболической активности миокарда и могут быть полезны для уточнения границ мишени при планировании STAR, хотя пока не вошли в рутинную клиническую практику навигации. Современные исследования показывают, что использование таких технологий, как SPECT с технецием-99m ( $^{99m}\text{Tc}$ ) и ПЭТ с рубидием-82 ( $^{82}\text{Rb}$ ) или аммиаком, меченным азотом-13 ( $^{13}\text{N}$ -ammonia), позволяет дополнительно охарактеризовать ишемические и функциональные особенности миокарда [48, 49]. Несмотря на более низкое пространственное разрешение по сравнению с КТ и МРТ, наложение анатомических данных КТ на радионуклидные изображения способствует более точному определению целевой области и повышает согласованность междисциплинарного планирования.

Для количественной оценки и локализации целевых участков применяется сегментная модель АНА-17 (2017), учитывающая доминирующее коронарное кровоснабжение [50]. Радиофармпрепарат  $^{123}\text{I}$ -метайодбензилгуанидин ( $^{123}\text{I}$ -MIBG), являющийся аналогом норадреналина, используется для оценки симпатической иннервации миокарда с помощью SPECT и скинтиграфии у пациентов с сердечной недостаточностью. Несмотря на ограниченное количество исследований, отмечалась связь между региональными нарушениями иннервации и клиническими исходами при ЖТ [51]. В то время как одни данные указывают на отсутствие выраженной динамики визуализации с использованием MIBG после проведения STAR [52], другие предполагают, что уменьшение несоответствия между перфузией и результатами MIBG-SPECT может коррелировать с успешностью аблации у пациентов с ишемическим поражением миокарда [53]. Перспективным направлением считается применение  $^{11}\text{C}$ -гидроксифедрина - более точного метода визуализации

симпатической активности. Методы радионуклидной визуализации являются неинвазивными, позволяют отслеживать динамику заболевания и, возможно, будут способствовать стандартизации подбора мишени для облучения в рамках терапии STAR в будущем.

К перспективным и уже вошедшим в клиническую практику методам, можно отнести систему для неинвазивного активационного картирования сердца АМИКАРД. Так поверхностное электрокардиографическое картирование заключается в синхронной регистрации униполярных электрокардиограмм во множестве точек на поверхности грудной клетки, визуальном представлении результатов регистрации ЭКГ в виде изопотенциальных и других изопараметрических карт и их диагностической интерпретации и визуализации на анатомической модели сердца. Поверхностное картирование ЭКГ находит все большее применение для диагностики нарушений сердечного ритма, прогнозирования жизнеопасных желудочковых тахикардий. Этот метод верифицирует локализацию критических участков re-entry, включая эпикардальные зоны аритмогенного субстрата и определяет концепцию неинвазивного лечения аритмий - от топической диагностики к лечению.

### Электроанатомическое инвазивное картирование (ЭАК)

Инвазивное электроанатомическое картирование на сегодняшний день остаётся основным методом локализации аритмогенного субстрата при подготовке к проведению STAR и признаётся «золотым стандартом» в этой области [54, 55]. При недостаточной информативности стандартных подходов дополнительно применяются неинвазивное ЭКГ-картирование, эпикардальное картирование в рамках ЭФИ, а также различные методы визуализации.

Ключевым этапом подготовки к лечению является интеграция анатомических и электрофизиологических данных (ЭАК, КТ, МРТ) с формированием унифицированной 3D-модели сердца, на основе которой проводится планирование лучевого воздействия [56 - 58]. В ряде исследований объём облучения формировался путём совмещения данных ЭАК с КТ и, при необходимости, с контрастной МРТ. Однако в многоцентровом исследовании RAVENTA были выявлены расхождения в определении клинического целевого объёма (clinical target/tumor volume - CTV) между ЭАК и КТ, что подчёркивает существующие сложности стандартизации [59].

Особые трудности наблюдаются у пациентов с гипертрофированным миокардом, например, при гипертрофической кардиомиопатии - в таких случаях объёмы, определённые по данным ЭАК и КТ, могут не совпадать. Дополнительно следует учитывать, что циркуляция физраствора во время катетерной аблации способна искажать визуализацию объёма левого желудочка при КТ.

### Артефакты и технические решения проблемы

Применение КТ и МРТ с отсроченным контрастированием затрудняется наличием ИКД, создающих артефакты, а также высокой подвижностью сердца, что может снижать точность дозиметрического планирования [60, 61]. Для минимизации этих ограничений

применяются различные технические решения: одно-энергетическая КТ с подавлением артефактов от металла, алгоритмы компенсации сердечной подвижности второго поколения, нейросетевые методы реконструкции изображений, автоматизированная сегментация анатомических структур, а также технология фотонно-считающей КТ (photon-counting CT) [62-70].

#### Объём мишени и дозиметрические подходы при проведении STAR

В контексте STAR продолжается активное накопление сведений о визуализационных и электрофизиологических критериях, используемых для выделения аритмогенных зон, а также о технических параметрах лечения - таких как размеры облучаемых объёмов, режимы дозирования и ограничения на облучение критически важных структур. Однако текущие данные говорят о существенной неоднородности в подходах к определению целевых объёмов, используемых методологиях и полноте описания аспектов подготовки таких процедур [71].

В клинической практике основными контурами при планировании STAR являются клинический целевой объём (clinical tumor/target volume - CTV), включающий предполагаемый субстрат ЖТ (например, зоны фиброза, участки замедленной активации), и планируемый целевой объём (planning tumor/target volume - PTV), формируемый путём расширения CTV с учётом возможных погрешностей позиционирования, дыхательных и кардиальных движений. В качестве дополнительного элемента в ряде протоколов используется также внутренний целевой объём (internal tumor/target volume - ITV) - CTV с добавленным запасом на амплитуду движения, определённую по данным 4D-КТ. Для формирования PTV к ITV обычно прибавляют 5-10 мм, в зависимости от применяемой техники и системы наведения.

Согласно анализу данных из нескольких исследований, объём PTV при STAR варьировал от 3,5 до 345 мл (медиана - 81,2 мл), объём CTV - от 6,75 до 108,7 мл (медиана - 34,6 мл), тогда как объём GTV сообщался реже (медиана - 25,1 мл) и не имеет стандартизированных критериев выделения в контексте применения методики при лечении ЖТ [72]. Это связано с отсутствием визуализирующего метода, способного точно охватить весь аритмогенный субстрат без включения жизнеспособного миокарда, поэтому при определении CTV особое внимание уделяется обеспечению безопасности пациента.

В качестве стандартной схемы дозирования при STAR применяется однократная доза 25 Гр, при этом рекомендуется, чтобы не менее 95 % объёма PTV было покрыто данной дозой. Наряду с этим крайне важно учитывать ограничения

на облучение критически значимых анатомических структур, в первую очередь самого миокарда и коронарных артерий. Исторически дозовые ограничения формировались на основе данных о лучевой кардиотоксичности при химиолучевой терапии опухолей средостения. В соответствии с рекомендациями ААРМ TG-101, объём сердца, получающий  $\geq 16$  Гр (параметр V16), не должен превышать 15 см<sup>3</sup>, а максимальная точечная доза (Dmax) на сердце не должна превышать, по различным оценкам, 22 Гр [17, 73, 74] (рис. 2).

#### Источники неопределённости при таргетировании

Планирование STAR сопровождается рядом источников неопределённости, способных повлиять на точность доставки дозы. К основным из них относятся:

- Точность локализации аритмогенного субстрата. Электроанатомическое картирование (ЕАМ) является ключевым компонентом таргетирования, однако его информативность зависит от плотности точек и пространственного разрешения. Следует учитывать, что зона рубца не всегда полностью соответствует аритмогенному субстрату ЖТ.

- Интеграция мультимодальных данных. Совмещение данных ЕАМ с КТ, МРТ или ПЭТ требует точного сопоставления анатомических ориентиров. Показано, что ошибки регистрации - в том числе ротационные и сдвиговые - чаще возникают при локализации мишени на латеральной стенке или в области межжелудочковой перегородки [71].

- Перенос данных в систему планирования. Ручной перенос контуров имеет ограниченную точность и может приводить к геометрическим ошибкам. Прямая интеграция зарегистрированных наборов данных повышает воспроизводимость, однако требует специализированного программного обеспечения.

- Кардиореспираторная подвижность. Движение сердца и дыхательные экскурсии создают суммарную позиционную неопределённость, затрудняющую достижение конформного распределения дозы.

Для точного таргетирования и равномерной подачи дозы необходимо учитывать как дыхательные, так и

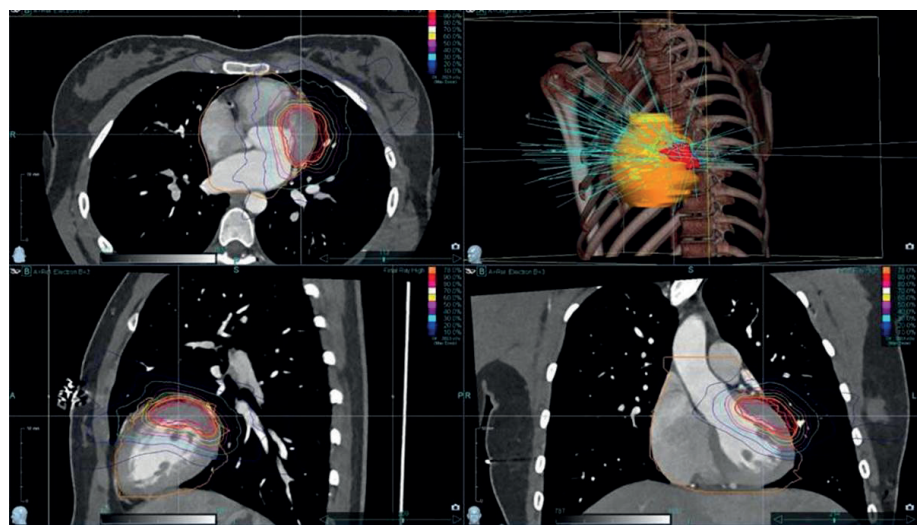


Рис. 2. Визуализация распределения дозы облучения, проекция области мишени в левом желудочке сердца на нативную компьютерную томографию сердца пациента в системе планирования облучения Precision.

кардиальные движения. Пульсации сердца, в отличие от дыхания, обычно закладываются в расчёт ITV или PTV.

#### **Управление дыхательной подвижностью**

Для компенсации дыхательных движений применяются следующие стратегии: формирование ITV на основании 4D-КТ или многофазной КТ, охватывающего все прогнозируемые положения мишени; гейтинг - синхронизация пучка с определённой фазой дыхательного цикла (например, на выдохе) с использованием внешних респираторных мониторов; трекинг - роботизированное отслеживание положения мишени в реальном времени. Например, система CyberKnife сопоставляет положение светодиодов на груди пациента с положением мишени; задержка дыхания (breath-hold) - проведение облучения в условиях фиксированной фазы дыхания. VMAT обеспечивает быстрое выполнение процедуры и может быть предпочтителен при нестабильности состояния пациента, тогда как CyberKnife позволяет более точно ограничить дозовую нагрузку на критические структуры, включая клапаны сердца [72].

#### **Учёт кардиальной подвижности**

Кардиальная подвижность является самостоятельным источником неопределённости. В отличие от дыхательной, она обусловлена фазами сердечного цикла и не устраняется методами иммобилизации. В литературе описаны следующие подходы к её компенсации:

ЭКГ-синхронизированный гейтинг - облучение активируется в заданной фазе сердечного цикла (чаще в диастолу) с использованием сигнала ЭКГ в реальном времени; экспериментальные исследования на динамических фантомах продемонстрировали повышение точности доставки дозы по сравнению с режимом без гейтинга [75].

Использование внутрисердечных ориентиров для трекинга - электроды ИКД или ЭКС, перемещающиеся синхронно с миокардом, могут служить рентгенконтрастными ориентирами на роботизированных радиохирургических системах [76].

ЭКГ-синхронизированная КТ - многофазная КТ с синхронизацией по сердечному циклу позволяет количественно оценить амплитуду смещения сердца и учитывать её при формировании целевого объёма.

Формирование кардиального ITV - при отсутствии систем гейтинга или трекинга диапазон кардиального движения включается в ITV на основании анализа многофазной или 4D-КТ; в клинической практике данный подход остаётся наиболее практически реализуемым. В настоящее время коммерческие системы полного трекинга сердечного движения на стандартных линейных ускорителях отсутствуют.

Одним из перспективных направлений является выполнение радиоабляции при стабильном навязанном ритме с синхронизацией по фазе сердечного цикла, что потенциально повышает предсказуемость движения мишени. В работе C.Q.M.Reis et al. (2025) продемонстрирована реализуемость такого подхода при ЧСС до 120 уд/мин и подтверждена стабильность доставки дозы в условиях высокочастотного гейтинга [75].

Таким образом, планирование STAR требует взвешенного подхода, обеспечивающего оптимальное покрытие аритмогенной зоны при строгом соблюдении

дозовых ограничений. Совершенствование визуализирующих методов, внедрение алгоритмов управления движением и развитие планировочных технологий позволяют точнее формировать CTV, ITV и PTV, повышая как безопасность, так и эффективность проводимой терапии.

### **МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ STAR**

Клиническая доказательная база применения STAR при ЖТ в настоящее время находится на этапе формирования. Большинство опубликованных данных получено в рамках небольших одноцентровых серий и проспективных когортных исследований с ограниченной продолжительностью наблюдения. Рандомизированные сравнительные исследования пока единичны, а их результаты находятся в стадии ожидания. В этой связи представленные ниже данные структурированы по мере увеличения уровня доказательности - от первых клинических серий к проспективным исследованиям, многоцентровым инициативам и текущим рандомизированным проектам.

#### **Клинические серии**

Первое клиническое исследование, посвящённое применению STAR при ЖТ, было опубликовано в 2017 году группой P.Cuculich и соавт. и включало пять пациентов с ишемической и неишемической кардиомиопатией [19]. Работа продемонстрировала принципиальную возможность неинвазивного воздействия на аритмогенный субстрат и положила начало клиническому развитию метода.

Наиболее крупный одноцентровый опыт на сегодняшний день представлен серией из 36 пациентов, пролеченных в Чешской Республике с 2014 года; во всех случаях применялось однократное облучение в дозе 25 Гр [20].

Первый азиатский клинический опыт применения STAR у пациентов с рефрактерной ЖТ представлен серией из Тайваня [77]. На этапе планирования использовались трёхмерное электроанатомическое картирование, МРТ с отсроченным контрастированием и двухэнергетическая КТ для уточнения локализации аритмогенного субстрата. Облучение выполнялось однократно в дозе 25 Гр с использованием системы Varian TrueBeam/Edge. В исследование (2019-2023 гг.) были включены 11 пациентов с ЖТ, резистентной к медикаментозной терапии и как минимум одной катетерной абляции. При медиане наблюдения 53 месяца снижение частоты эпизодов ЖТ в первые 6 месяцев составило 88%; у части пациентов в отдалённые сроки отмечались рецидивы, потребовавшие повторной катетерной абляции. Годичная выживаемость составила 83%.

На раннем этапе клинического внедрения доказательная база была ограниченной: исследования включали небольшое число пациентов, не предусматривали контрольных групп и характеризовались сравнительно коротким сроком наблюдения. Тем не менее первые серии продемонстрировали клиническую реализуемость подхода и стали отправной точкой для последующего перехода к проспективным исследованиям и международным многоцентровым инициативам.

### Перспективные исследования

Клиническое применение STAR началось в 2018 году и быстро приобрело международное распространение. Одним из ключевых этапов стало проспективное исследование I/II фазы ENCORE-VT (Electrophysiology-Guided Noninvasive Cardiac Radioablation for Ventricular Tachycardia), результаты которого были опубликованы в 2019 году. Данная работа показала, что применения STAR технологии у пациентов с рефрактерными ЖТ снижает число эпизодов ЖТ на 94%, а также значительно уменьшает количество срабатываний ИКД [78].

### Многоцентровые инициативы и стандартизация

Развитие методики получило продолжение в рамках масштабной общеевропейской инициативы STOPSTORM (Standardized Treatment and Outcome Platform for Stereotactic Therapy Of Re-entrant Tachycardia by a Multidisciplinary consortium) - консорциума, направленного на стандартизацию подходов к применению STAR. В его состав входят 31 клиническое и научное учреждение из восьми стран Европейского союза, обладающих значительным опытом в области радиотерапии и интервенционной аритмологии. На момент запуска STOPSTORM было выполнено 84 процедуры STAR, причём 8 из 22 участвующих клиник параллельно проводили собственные национальные клинические исследования. В большинстве учреждений использовалась доза 25 Гр в одной фракции. Подходы к выбору мишени при этом варьировали: наиболее часто применялись электроанатомическое картирование во время ЖТ (96%), пейс-маппинг (75%), а также анализ поздних потенциалов и зон сниженного вольтажа в синусовом ритме [48].

Опыт немецких центров, представленных в консорциуме, демонстрирует не только высокий клинический интерес к технологии, но и стремление к гармонизации и стандартизации ключевых аспектов STAR, включая таргетинг, планирование и контроль качества облучения [1]. Исследования в рамках STOPSTORM продолжаются: регулярно публикуются промежуточные отчёты, направленные на уточнение параметров эффективности, безопасности и оптимизации терапевтического планирования.

Существенным этапом стала многоцентровая работа по эталонному планированию STAR, проведённая с участием 20 клинических центров [79]. Было разработано 67 планов облучения для трёх типичных клинических случаев устойчивой ЖТ, охватывающих широкий спектр анатомических и технических особенностей, включая близость критически важных структур и наличие выраженных артефактов от имплантированных устройств. В отличие от традиционных валидированных протоколов, данное исследование намеренно допустило вариативность подходов, чтобы отразить реальную клиническую практику. На основании обобщённого анализа и экспертных обсуждений были сформулированы рекомендации по планированию STAR. Было достигнуто согласие экспертных групп по ключевым параметрам: предписанная доза (25 Гр в одной фракции), продолжительность процедуры, общие требования к технике облучения, методам расчёта

дозы, а также подходам к компромиссам между покрытием PTV и ограничениями на критические структуры. Вместе с тем, по ряду технических и клинически значимых аспектов обсуждение продолжается. Данное исследование также отразило существующую в европейских учреждениях гетерогенность в подходах к планированию лечения STAR и подтвердило необходимость дальнейшей гармонизации как технических, так и клинических параметров. Ввиду ограниченности данных по безопасности и эффективности STAR на больших когортах, выработка консенсуса по оптимальной методике остаётся актуальной задачей.

### Текущие и планируемые рандомизированные контролируемые исследования

Крупнейшим на сегодняшний день международным многоцентровым рандомизированным исследованием, одобренным регуляторными органами США, является RADIATE-VT (Cardiac RADIOablation versus repeat catheter Ablation: a pivotal randomized clinical Trial Evaluating safety and efficacy for patients with high-risk refractory Ventricular Tachycardia, NCT05765175), инициированное Вашингтонским университетом в Сент-Луисе. В исследование планируется включить 380 пациентов в 30 центрах для прямого сравнения неинвазивной STAR с повторной инвазивной аблацией у больных с рефрактерной мономорфной ЖТ (ишемической или неишемической этиологии) при сниженной фракции выброса ЛЖ ( $\leq 49\%$ ) и неэффективности, либо непереносимости амиодарона. Пациенты будут рандомизированы в соотношении 1:1 в группы повторной катетерной аблации или неинвазивной радиоаблации с применением экспериментальной платформы компании Varian. Проведение процедуры требует тесного междисциплинарного взаимодействия между специалистами в области интервенционной аритмологии и радиационной онкологии. Первичной конечной точкой заявлено доказательство не меньшей эффективности STAR при более высокой безопасности по сравнению с повторной катетерной аблацией; вторичные точки включают качество жизни и частоту эпизодов аритмии. Хотя результаты RADIATE-VT пока не опубликованы, сам факт его проведения подчёркивает возросший интерес к STAR как перспективной альтернативе традиционным методам.

### Систематические обзоры и мета-анализы

В работе A.Gupta и соавторов. был проведён обобщающий анализ клинических исследований, посвящённых применению STAR при рефрактерной ЖТ [80]. Авторы статьи провели всесторонний систематический поиск научной литературы, охватывающий период до марта 2024 года. Целью было выявление клинических исследований, в которых описывались случаи применения STAR у пациентов с ЖТ. В отбор включались только те работы, где участвовали не менее трёх пациентов, прошедших STAR, и были представлены количественные данные о частоте рецидивов аритмий и/или вмешательств со стороны ИКД. При этом из анализа исключались обзоры, мета-анализы, дубликаты публикаций и отдельные клинические случаи. В результате в мета-анализ было включено 23 исследования, опубликованных в период с 2017 по 2024

год, в совокупности охватывающие 225 пациентов. Основной аналитический подход заключался в расчёте отношений частот эпизодов ЖТ, срабатываний антиахикардической стимуляции и шоков ИКД до и после применения STAR, с использованием модели случайных эффектов. Временная граница между периодами «до» и «после» терапии устанавливалась после шестинедельного «слепого» периода, необходимого для исключения краткосрочного влияния процедуры. Помимо показателей эффективности, исследователи проанализировали частоту осложнений, а также данные по общей выживаемости пациентов в рамках доступных сроков наблюдения.

По демографическим характеристикам проанализированной популяции: средний возраст пациентов составил 67 лет, при этом большинство (около 85%) составляли мужчины. Примерно у половины пациентов (52%) причиной развития аритмии являлась ишемическая кардиомиопатия. Все пациенты страдали тяжёлой формой рефрактерной ЖТ, не поддающейся лечению антиаритмическими препаратами и неоднократной катетерной аблацией (в среднем 1,9 процедуры на одного пациента). В ряде исследований подчёркивается, что SBRT применялась как последняя, паллиативная мера при исчерпании других терапевтических опций.

Почти во всех случаях использовалась стандартная доза облучения - 25 Гр, подведенная за одну фракцию; лишь в отдельных исследованиях отмечались вариации (например, 22-23 Гр). Средний объём планируемой зоны облучения составлял 84 мл. Продолжительность наблюдения за пациентами после процедуры варьировала от 5,8 до 28 месяцев, в среднем - около года. Таким образом, данный мета-анализ представляет на сегодняшний день наиболее полное обобщение клинических данных о применении STAR при рефрактерной ЖТ.

Сообщения о тяжёлых побочных эффектах встречались относительно редко. Наиболее частыми были перикардиальные осложнения (8%), включая лучевой перикардит, выпот и фиброз, а также лёгочные проявления, такие как пневмонит и интерстициальный фиброз (5,8%). Тем не менее, в ряде случаев были зафиксированы тяжёлые поздние осложнения, в частности образование свищей между перикардом и пищеводом. Зафиксированы два таких случая: эзофагоперикардиальный свищ [81] и гастроперикардиальный свищ, оба развившиеся через несколько месяцев после STAR. Несмотря на наличие неблагоприятных исходов, в целом методика STAR продемонстрировала выраженный клинический эффект. До проведения облучения суммарная частота эпизодов ЖТ составляла 25,7 на пациента-месяц, а количество вмешательств ИКД - 29 (включая срабатывания антиахикардической стимуляции и шоки). После STAR эти показатели значительно снизились: до 2,3 эпизодов ЖТ и 3,9 вмешательств ИКД на пациенто-месяц соответственно, что эквивалентно примерно десятикратному уменьшению. В рамках мета-анализа были рассчитаны отношения частот «после/до» проведения SBRT: 0,10 для ЖТ, 0,09 для шоков ИКД, все различия статистически значимы ( $p < 0,00001$ ).

Несмотря на столь значительное общее снижение частоты аритмий, полной ремиссии удалось достичь

не у всех пациентов. Так, уже в течение первых шести месяцев после лечения почти у половины пациентов наблюдались повторные эпизоды ЖТ, около 30% вновь подвергались шокам ИКД, а у 20% возникала необходимость в повторной аблации - как инвазивной, так и с помощью повторного курса STAR. Тем не менее, существенное снижение общей аритмической нагрузки и уменьшение количества болезненных ИКД-разрядов позволяют говорить об улучшении качества жизни большинства пациентов.

Важно отметить, что на фоне проведённой терапии ухудшения систолической функции левого желудочка не отмечалось: средняя фракция выброса до SBRT составляла 30,9%, а после - 32,4%, что было статистически не значимо ( $p=0,3$ ). С учётом краткого срока наблюдения и тяжести состояния пациентов, эти данные являются обнадеживающими. По объединённой оценке выживаемости общий уровень выживания пациентов через 12 месяцев после процедуры составил 72%, а через 24 месяца - 57%, что соответствует приблизительно 43% смертей за двухлетний период. Как подчёркивают авторы, основная причина летальных исходов заключалась не в аритмических событиях, а в прогрессировании сердечной недостаточности [82].

Таким образом, STAR сердца демонстрирует высокий потенциал как неинвазивный метод лечения устойчивых ЖТ у пациентов с ограниченными терапевтическими возможностями. Несмотря на серьёзность исходного состояния и наличие определённых рисков, в большинстве случаев отмечается значительное снижение частоты аритмий без ухудшения сердечной функции. Однако высокая смертность в этой популяции подчёркивает необходимость дальнейших исследований для оценки долгосрочной эффективности метода и его влияния на выживаемость.

### СЕРИЯ КЛИНИЧЕСКИХ СЛУЧАЕВ ИЗ ПРАКТИКИ АВТОРОВ

Первый в России клинический случай применения STAR при рефрактерной ЖТ был реализован под руководством А.Ш.Ревитшвили и А.В.Голанова [83]. Основанием для перехода к клиническому использованию метода на человеке послужили собственные экспериментальные исследования на модели крупных животных, а также накопленные к тому времени международные данные, подтверждающие эффективность и безопасность технологии [40]. Ниже представлены клинические наблюдения, полученные в рамках программы локальной клинической апробации метода. Проведение лечения было одобрено локальным этическим комитетом, все пациенты подписали информированное согласие на выполнение процедуры и использование обезличенных данных в научных публикациях.

Радиохирургическое лечение было выполнено у 57-летнего пациента с ишемической кардиомиопатией и рецидивирующей ЖТ, рефрактерной к антиаритмической терапии и неоднократным радиочастотным абляциям. Предшествующее вмешательству электрофизиологическое картирование позволило точно локализовать аритмогенные участки в области межжелудочковой перегородки и заднеапикальных сегментов

левого желудочка, что легло в основу планирования мишени для радиохирургического воздействия. Облучение проводилось на линейном ускорителе TrueBeam (Varian Medical) в режиме дыхательного контроля, однократно, с суммарной дозой 25 Гр, доставленной двумя компланарными арками на 95% планируемого объема (PTV - 46 см<sup>3</sup>). Все дозовые ограничения на критически важные структуры были соблюдены, визуализация распределение дозы облучения представлена на рис. 3. В течение первых недель после процедуры сохранялись редкие эпизоды аритмии, однако уже с 64-го дня и вплоть до конца периода наблюдения (450 суток) ни одного случая ЖТ зафиксировано не было. Побочных эффектов и признаков лучевого поражения окружающих тканей не выявлено.

Вторым пациентом, прошедшим лечение в рамках программы локальной клинической апробации метода STAR, стал 60-летний мужчина с тяжелой формой ишемической кардиомиопатии. В анамнезе - инфаркт миокарда, аортокоронарное шунтирование и имплантация устройства ресинхронизирующей терапии с функцией дефибрилляции (CRT-D, Brava DR). Несмотря на проводимую медикаментозную терапию и ранее выполненную радиочастотную абляцию, у па-

циента сохранялись эпизоды ЖТ, включая устойчивые формы с частотой желудочковых сокращений более 110 уд/мин. Повторные пароксизмы нарушали качество жизни и повышали риск неблагоприятных исходов. С учётом рефрактерного течения аритмии, а также отсутствия эффекта от традиционных методов, было принято решение о применении неинвазивной STAR. Как и в первом случае, лечение осуществлялось совместными усилиями мультидисциплинарной команды под руководством А.Ш.Ревишвили и А.В.Голанова с использованием линейного ускорителя TrueBeam [83]. Планирование терапии включало определение аритмогенного субстрата в проекции сегментов 14-16 левого желудочка. Объём клинически значимой мишени (GTV) составил 18,5 см<sup>3</sup>, а планируемого объёма облучения (PTV) - 40,9 см<sup>3</sup>. Предписанная доза составила 30 Гр, доставленных однократно с соблюдением всех дозовых ограничений на критически важные анатомические структуры, визуализация распределение дозы облучения представлена на рис. 4. Как и в случае с первым пациентом, план состоял из двух полных компланарных арок (источник излучения совершал два оборота 360° вокруг пациента в плоскости, перпендикулярной оси его тела) (рис. 5). Начиная с момен-

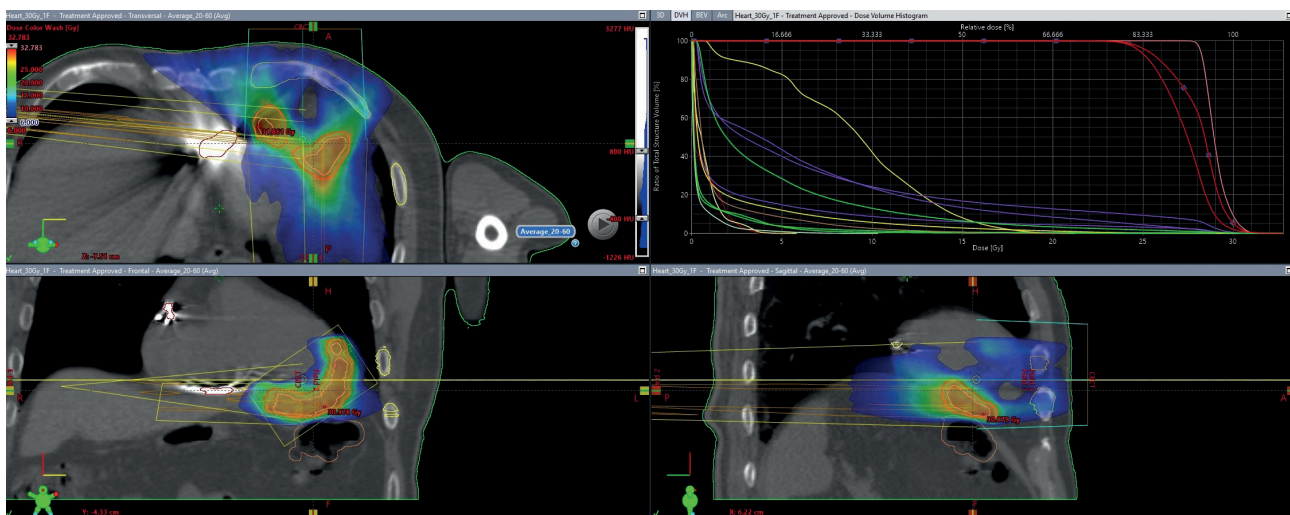


Рис. 3. Визуализация распределения дозы облучения, проекция области-мишени в левом желудочке сердца на нативную компьютерную томографию сердца пациента в системе планирования облучения Eclipse.

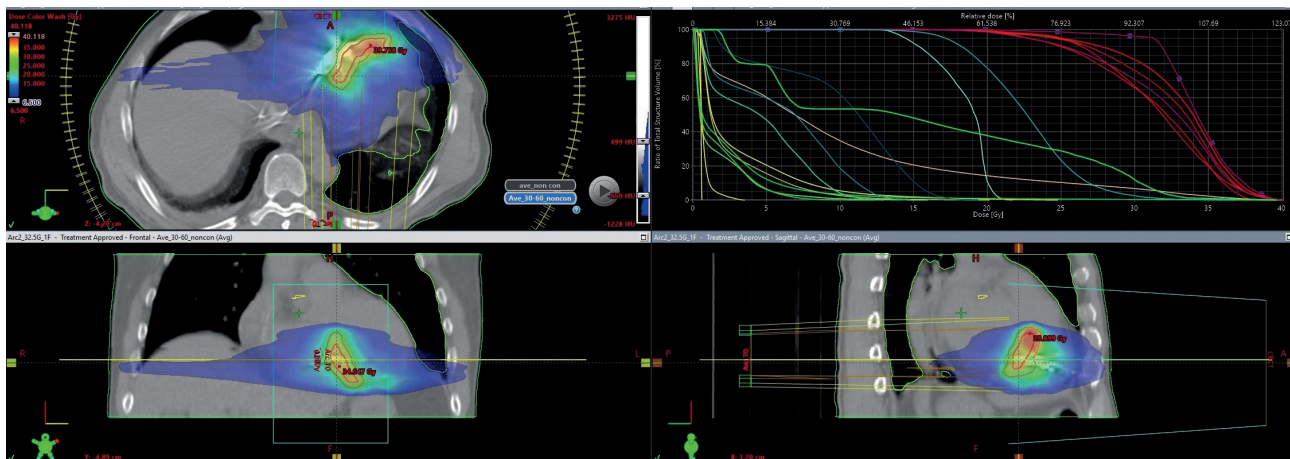


Рис. 4. Визуализация распределения дозы облучения, проекция области-мишени в проекции сегментов 14-16 левого желудочка на нативную компьютерную томографию сердца пациента в системе планирования облучения Eclipse.

та проведения процедуры (07.02.2022), у пациента не наблюдалось ни одного эпизода ЖТ, что указывает на возможную эффективность метода даже в наиболее сложных клинических ситуациях.

Полученные результаты демонстрируют не только техническую реализуемость метода, но и его клиническую состоятельность, что открывает перспективы дальнейшего применения технологии STAR в отечественной аритмологической практике.

### ОБСУЖДЕНИЕ

STAR представляет собой инновационный неинвазивный метод лечения устойчивых ЖТ, в первую очередь у пациентов с постинфарктными рубцами миокарда. Метод находится на этапе активного изучения, и вопросы оптимизации эффективности и безопасности STAR продолжают обсуждаться экспертами.

На доклиническом уровне описаны два основных механизма антиаритмического действия однократного облучения сердца. Во-первых, при дозах свыше около 30 Гр развивается лучевой миокардиальный фиброз и коагуляционный некроз в зоне мишени, что может электрически изолировать аритмогенный субстрат. Во-вторых, при «умеренных» дозах (20-25 Гр) происходит модуляция электрофизиологических свойств миокарда без формирования грубого рубца - через активацию сигнальных путей (Notch и др.), изменяющих экспрессию ионных каналов. Однако клинические данные о механизмах STAR пока неоднородны, что затрудняет выработку универсального подхода к выбору оптимальной дозы и объема облучения. Это подчеркивает сложность радиобиологических эффектов и необходимость индивидуализированного планирования терапии для каждого пациента.

Предпринимаются попытки стандартизировать процедуру STAR на международном уровне. В частности, в рамках проекта STOPSTORM разработаны рекомендации по унификации методики облучения и протоколированию результата. Достигнуто предварительное согласие относительно целесообразности подробного документирования процедур STAR в соответствии с международным радиотерапевтическим стандартом ICRU №91 (описание объемов мишени, доз, контрольных точек и т.д.). Безусловно, дальнейшее накопление

опыта позволит уточнить технические параметры и повысить воспроизводимость метода в разных клиниках.

Эффективность STAR в клинических исследованиях оценивается преимущественно по снижению частоты рецидивов ЖТ у пациентов с ранее рефрактерной аритмией. В большинстве исследований наблюдается снижение числа эпизодов спустя 6 недель после облучения [84-86]. В одном из них сообщалось о 88% сокращении количества ЖТ в течение 6 месяцев [77].

В наиболее крупном мета-анализе на сегодня, выполненном A.Gupta et al., показано статистически значимое снижение частоты эпизодов ЖТ, активаций антитахикардической стимуляции и разрядов ИКД после проведения STAR (в среднем в 10 раз,  $p < 0,00001$ ), что подтверждает выраженный антиаритмический эффект метода [80].

Особенно важно, что снижение аритмической активности не сопровождалось ухудшением систолической функции - фракция выброса после облучения оставалась стабильной, что позволяет говорить не только об эффективности, но и о функциональной безопасности подхода. Тем не менее, у части пациентов сохранялись рецидивы аритмий, иногда требовавшие повторной абляции, включая повторный курс STAR.

Высокая летальность в анализируемой когорте, преимущественно связанная с прогрессированием сердечной недостаточности, подчеркивает необходимость более точного отбора пациентов и дальнейшего изучения отдаленных исходов. Также остаётся актуальным вопрос стандартизации методики: в разных исследованиях использовались различные протоколы таргетирования и облучения, что может влиять на воспроизводимость результатов.

На фоне этих ограничений особую актуальность приобретают и технические аспекты планирования и доставки дозы. Тем не менее, сохраняется высокий риск рецидивов, особенно при прогрессировании сердечной недостаточности или появлении новых аритмогенных субстратов [47, 57]. Кроме того, доза 25 Гр, подводимая к ITV, может быть недостаточной на периферии зоны интереса, особенно при наличии движения сердца и дыхания. Это подтверждается выявлением генеру механизмов по краю облученного рубца у пациентов, перенесших повторную катетерную абляцию.

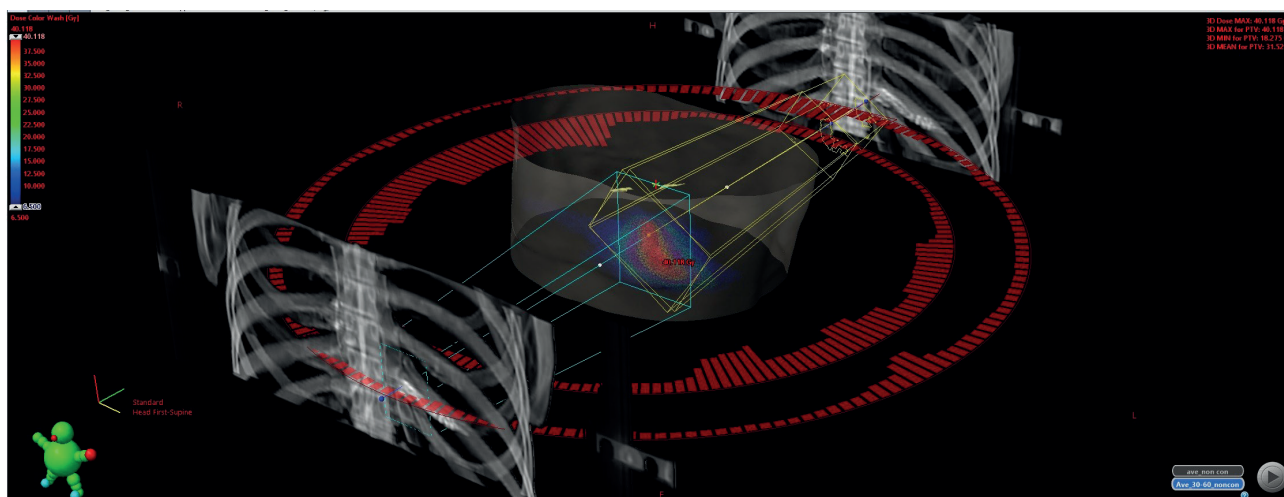


Рис. 5. Схема облучения с двумя полными компланарными арками.

Исторически облучение сердца ограничивалось из-за риска кардиотоксичности, выявленного, в частности, при лечении немелкоклеточного рака лёгкого [87, 88]. Согласно рекомендациям ААРМ TG101, объём сердца, получающий дозу 16 Гр (V16), не должен превышать 15 см<sup>3</sup>, а максимальная допустимая доза - 22 Гр [17, 73, 47]. Эти ограничения особенно актуальны при рассмотрении STAR как терапевтической опции у пациентов с выраженной систолической дисфункцией.

Облучение значительных объёмов сердца у таких пациентов может привести к дальнейшему снижению сократительной функции. Воздействие ионизирующего излучения на обширные участки миокарда сопряжено с риском гибели кардиомиоцитов и утратой контрактности оставшейся жизнеспособной ткани. Накопленные данные указывают на корреляцию между увеличением объёма облучаемой зоны (ITV) и ухудшением насосной функции, вплоть до развития декомпенсации СН. В связи с этим при планировании STAR требуется особая осторожность при выборе мишени, особенно у пациентов с уже сниженной фракцией выброса.

#### **Осложнения и безопасность STAR**

В опубликованных исследованиях острая токсичность STAR характеризуется как относительно низкая, тогда как частота поздних осложнений может быть недооценена вследствие короткого периода наблюдения (чаще до 1 года). Наиболее частые из описанных осложнений - транзиторная тошнота, перикардит, эзофагит, пневмонит лёгких (в лёгкой или средней степени) [74]. В подавляющем большинстве случаев они регрессируют на фоне консервативной терапии и не приводят к стойкой инвалидизации пациентов.

#### ***Перикард***

Перикардит относится к проявлениям острой токсичности и описан в клинических сериях, в отдельных случаях требуя медикаментозной терапии [74]. Сообщалось также о развитии перикардального фиброза [89]. В экспериментальных исследованиях на животных наблюдались стерильные перикардальные выпоты, которые, как правило, уменьшались со временем [32].

#### ***Пищевод и желудочно-кишечный тракт***

Эзофагит является принципиально значимым осложнением ввиду анатомической близости пищевода к задней стенке сердца. Зарегистрированы случаи тяжёлых осложнений, включая эзофагит с летальным исходом вследствие пищеводно-перикардальной фистулы, и гастро-перикардальной фистулы, потребовавшей хирургического вмешательства [90]. На сегодняшний день нет доказательств эффективности медикаментозной профилактики этих редких, но грозных осложнений. Поэтому акцент делается на тщательном планировании: строгом ограничении дозовой нагрузки на пищевод и желудок, применении диафрагмального дыхания и других мер для отведения пучка от органов желудочно-кишечного тракта.

#### ***Лёгкие и бронхи***

Лучевой пневмонит относится к числу наиболее часто описываемых острых осложнений после STAR и выявляется при контрольной КТ, как правило, через 3 месяца после процедуры. По данным K.Banfill и соавт., изменения в лёгочной ткани регистрируются

примерно у 20-30% пациентов, при этом в большинстве случаев течение носит благоприятный характер и лишь отдельным больным требуется назначение глюкокортикостероидов [74].

Риск развития пневмонита выше у пациентов с исходными интерстициальными заболеваниями лёгких. Данные лучевой терапии у онкологических пациентов показывают, что вероятность радиационно-индуцированного поражения лёгочной ткани, включая пневмонит и последующий фиброз, зависит от суммарной дозы и объёма облучённого лёгкого (J.J.Nuytens et al., 2016), что следует учитывать и при планировании STAR [91].

В экспериментальных условиях при высоких дозах облучения (37,5 Гр) описаны тяжёлые осложнения со стороны бронхиального дерева, включая формирование бронхемедиастинального свища [39].

#### ***Коронарные артерии и клапанный аппарат***

Описано развитие коронарного атеросклероза через 2-3 года после STAR, особенно при близком расположении сосудов к зоне облучения (PTV). В подобных случаях целесообразно проведение динамического наблюдения с плановой оценкой признаков ишемии миокарда в отдалённые сроки.

В чешском исследовании (J.Našková и соавт., 2024) у 25% пациентов через несколько месяцев после STAR отмечено усиление митральной регургитации, причём троим потребовалось хирургическое вмешательство [20]. В другом наблюдении (M.H.Van der Ree и соавт., 2023) спустя год отмечено ухудшение функции клапанов сердца на  $\geq 2$  степени у ряда больных [92].

Описан также случай быстрого прогрессирования аортального стеноза [89]. В связи с этим рекомендуется регулярная эхокардиография, особенно если клапаны сердца находились в непосредственной близости к зоне облучения [73].

#### ***Взаимодействие с имплантируемыми устройствами***

По данным многоцентрового исследования, при применяемых дозах STAR не сопровождается клинически значимыми нарушениями функционирования ИКД: показатели sensing, пороги стимуляции и импеданс оставались стабильными, а единичный случай перезагрузки устройства не имел клинических последствий [93].

Тем не менее при планировании необходимо учитывать расположение дистальных электродов. Облучение миокарда в зоне их контакта теоретически может привести к повышению порога стимуляции и утрате электрического захвата миокарда, что потенциально ограничивает терапевтические возможности устройства.

Согласно опубликованным данным [75], максимальная доза на основные электронные компоненты ИКД варьировала от 0,04 до 0,603 Гр при средних значениях около 0,02 Гр. В ряде работ (например, O.Blanck и соавт., 2020) рекомендуется ограничивать максимальную дозу на электронику уровнем  $\leq 0,5$  Гр. Контроль дозовой нагрузки на компоненты устройства следует рассматривать как обязательный элемент планирования [94].

#### ***Смертность***

Пациенты с устойчивыми к катетерной абляции формами ЖТ находятся в группе повышенного риска

летального исхода. В ряде исследований смертность в течение одного года достигала 28%, что сопоставимо с 32%, зафиксированными при раннем рецидиве ЖТ после абляции [95]. При этом сама ЖТ может быть как причиной летального исхода, так и маркером прогрессирующей сердечной недостаточности. В исследовании VANISH, сравнивавшем абляцию с медикаментозной терапией, смертность через год составила 10-15% [96], без существенной разницы между группами. Аналогичные данные приводит мета-анализ [97], тогда как индивидуализированный мета-анализ [98] показал статистически значимое снижение смертности после абляции. У большинства пациентов, включённых в недавние исследования по SBRT, ранее уже проводились повторные абляции, что отражает тяжесть состояния. Многие из них не рассматривались как кандидаты для новых процедур и, соответственно, не могли быть включены в традиционные рандомизированные исследования.

Согласно мета-анализу [82], более половины летальных исходов в течение года после STAR были связаны с прогрессированием сердечной недостаточности, и лишь 6,5% - с рецидивом аритмий. Таким образом, влияние самой STAR на показатели выживаемости остаётся предметом дальнейших исследований.

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДИКИ

Одним из ключевых технических ограничений STAR остаётся движение сердца и мишени во время дыхания. Смещения аритмогенного субстрата снижают точность доставки дозы и могут приводить к «недооблучению» периферических участков PTV. Это особенно критично при использовании высоких доз на малых объёмах.

В эксперименте С. Q. M. Reis и соавт. была протестирована система гейтинга (подача излучения синхронно с определённой фазой дыхательного или сердечного цикла), синхронизированная с ЭКГ, с использованием динамического фантома, моделирующего движение сердца и лёгких [75]. Результаты показали высокое соответствие доставленной дозы плану (до 98-99% совпадения по  $\gamma$ -анализу) при использовании ЭКГ-гейтинга, тогда как без управления точность падала до 55-67% (особенно при сочетании движений сердца и дыхания).

Полученные данные подчёркивают важность внедрения гейтинга и/или трекинга в клиническую практику STAR, особенно при локализации мишени вблизи структур с высокой радиочувствительностью. Авторы отмечают стабильность работы линейного ускорителя TrueBeam в режиме высокочастотного прерывистого излучения, что критически важно для однократного фракционирования. Хотя исследование проводилось на физической модели (без живого пациента) и с ограниченным числом сценариев, оно убедительно демонстрирует преимущества технологий управления движениями при STAR. Клиническое внедрение подобных систем - синхронизации с ЭКГ, оптического трекинга миокарда, использования роботизированных установок с функцией слежения и т.д. может повысить точность и безопасность терапии, особенно при облучении мишеней вблизи высокочувствительных структур.

STAR представляет собой инновационный и активно развивающийся метод, клинический потенциал которого требует всестороннего изучения в рамках строго контролируемых исследований. Оценка его эффективности должна осуществляться с учётом текущего прогресса в области инвазивной электрофизиологии, включая внедрение технологий импульсной абляции и сверхнизкотемпературной криоабляции.

Ключевым направлением на ближайшую перспективу остаётся проведение высококачественных проспективных и сравнительных исследований. Эти работы должны включать подробную характеристику клинического профиля пациентов, описание используемой антиаритмической терапии, данных об абляциях и критериев отбора. Важным условием является стандартизированное отслеживание частоты рецидивов аритмии, выживаемости и других клинически значимых кардиологических исходов. Особое внимание должно уделяться длительному мониторингу функции сердца и клапанного аппарата, а также систематической регистрации осложнений лучевой терапии с использованием унифицированной терминологии. В этом контексте международные инициативы, такие как консорциум STOPSTORM, способны сыграть ведущую роль в гармонизации методологических подходов и стандартизации отчётности.

Несмотря на накопленные данные, остаётся ряд принципиально важных нерешённых вопросов. В первую очередь, требуется углублённое понимание молекулярных и электрофизиологических механизмов действия STAR - включая влияние на проводящую систему, экспрессию и функцию ионных каналов, микроциркуляцию, воспалительный ответ и нейрокардиальные взаимодействия. Во вторую очередь, необходимо уточнение оптимального режима дозирования и фракционирования, включая обоснование возможности повторного облучения при рецидивах. Определение радиочувствительности аритмогенного субстрата и времени наступления клинического эффекта остаётся задачей первоочередной важности.

Кроме того, остаются открытыми вопросы о выборе оптимальной мишени и стратегии таргетирования. Требуется оценка, является ли более оправданным облучение всей зоны рубцовых изменений или только критических участков re-entry-контуров. Необходима валидация методов интеграции данных визуализации с электрофизиологическими и функциональными исследованиями, включая оценку точности неинвазивного ЭАМ (ECGI) в сравнении с инвазивными методами наведения.

Подробный анализ влияния STAR терапии на миокард, коронарные артерии и клапанный аппарат, требует длительного наблюдения и скрупулёзной оценки отсроченных эффектов. Только на основании таких данных можно будет определить истинный профиль безопасности метода.

Решающим этапом в доказательстве эффективности STAR станет проведение рандомизированных исследований, сравнивающих его с традиционными методами лечения в различных клинических сценариях. Это включает сравнение с повторной катетерной

аблацией у пациентов с неудачным первичным вмешательством, а также с катетерной аблацией у пациентов с высоким риском осложнений. При подтверждении эффективности в этих группах возможно рассмотрение STAR как метода первой линии в отдельных категориях больных.

Таким образом, обладая значительным потенциалом как неинвазивная альтернатива при лечении злокачественных аритмий, STAR требует дальнейшей валидации на основе надёжных, воспроизводимых данных. Расширение его роли в клинической практике должно опираться исключительно на результаты рандомизированных и многоцентровых исследований высокого уровня доказательности.

### ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА STAR В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Несмотря на обнадеживающие клинические результаты, полученные в ведущих зарубежных центрах, широкое внедрение технологии STAR в клиническую практику в Российской Федерации на текущем этапе ограничено рядом системных и технических факторов. Проведение процедуры требует наличия специализированного оборудования, прежде всего - линейных ускорителей с функцией STAR, а также слаженной работы мультидисциплинарной команды, включающей аритмолога, радиотерапевта, радиолога, медицинского физика и специалиста по визуализации сердца [99]. Однако подобная инфраструктура на сегодняшний день доступна лишь в ограниченном числе центров, что существенно снижает воспроизводимость метода.

Кроме того, методика STAR пока не включена в клинические рекомендации Минздрава РФ и не обладает официальным статусом утверждённой медицинской технологии. Это ограничивает её применение в рутинной практике, исключает возможность финансирования в рамках системы обязательного медицинского страхования и затрудняет унификацию подходов к выбору пациентов и проведению процедуры. Существенные сложности связаны и с визуализацией: прецизионное определение мишени с учётом кардиореспираторной подвижности требует высокотехнологичных методов, таких как 4D-КТ, ЭКГ-синхронизированные исследования и интеграция анатомических и электрофизиологических данных. Отсутствие таких возможностей в ряде учреждений негативно влияет на качество планирования и, как следствие, на потенциальную эффективность терапии.

Наряду с этим, дефицит национальных клинических протоколов и методических рекомендаций вынуждает

клиницистов адаптировать зарубежные подходы, что не всегда возможно с учётом особенностей отечественной инфраструктуры. Отсутствие собственных долгосрочных наблюдений, особенно касающихся отсроченных осложнений (влияние на проводящую систему, коронарные артерии, клапанные структуры), требует особой осторожности в выборе пациентов, ограничивая применение метода у лиц с прогнозируемо высокой продолжительностью жизни. Тем не менее, в России уже сформированы предпосылки для развития технологии STAR. Первая в стране клиническая процедура была успешно выполнена мультидисциплинарной командой под руководством А.Ш.Ревিশвили и А.В.Голанова с использованием линейного ускорителя TrueBeam.

В перспективе развитию метода будет способствовать формирование нормативной базы, расширение числа центров, обладающих необходимой компетенцией, а также интеграция российских учреждений в международные исследовательские консорциумы. При условии институциональной поддержки и продолжения клинической апробации STAR может занять важное место в терапии резистентных желудочковых аритмий, особенно в случаях, когда возможности традиционных подходов оказались исчерпаны.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

STAR - это один из наиболее обсуждаемых инновационных подходов к лечению рефрактерных ЖТ. На сегодняшний день опубликованные данные демонстрируют выраженное снижение частоты аритмий после однократного облучения в дозе около 25 Гр. Первые клинические результаты обнадеживают, особенно в группах пациентов, где другие методы оказались неэффективными или технически невозможными.

Однако метод остаётся новым и пока недостаточно изученным. В ряде случаев рецидивы ЖТ возникают уже в течение первого-второго года наблюдения, а влияние на долгосрочную выживаемость и сердечную функцию остаётся открытым вопросом. Необходимо учитывать и тот факт, что выполнение процедуры требует высокой степени технической оснащённости и координации между специалистами, а также индивидуального подбора пациентов с обязательным междисциплинарным обсуждением.

Несмотря на это, потенциал метода очевиден. При условии дальнейшего научного сопровождения и накопления клинического опыта, STAR может занять прочное место среди лечебных стратегий для пациентов с тяжёлыми, резистентными желудочковыми аритмиями - прежде всего как неинвазивная альтернатива в высокорисковых случаях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kawamura M, Shimojo M, Tatsugami F, et al. Stereotactic arrhythmia radioablation for ventricular tachycardia: a review of clinical trials and emerging roles of imaging. *J Radiat Res.* 2025 Jan;66(1): 1-9. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrae090>.
2. Kong MH, Fonarow GC, Peterson ED, et al. Systematic review of the incidence of sudden cardiac death in the United States. *J Am Coll Cardiol.* 2011 Feb;57(7): 794-801.
3. Ревিশвили АШ. Неинвазивная диагностика и аблация аритмий - миф или реальность? *Вестник аритмологии.* 2020;27(3): 5-8. [Revishvili ASh. Noninvasive arrhythmia mapping and ablation - myth or reality? *Journal of Arrhythmology.* 2020;27(3): 5-8. (In Russ.)] <https://doi.org/10.35336/VA-2020-3-5-8>.
4. Moss AJ, Schuger C, Beck CA, et al. Reduction in inappropriate therapy and mortality through ICD program-

- ming. *N Engl J Med.* 2012 Dec;367(24): 2275-83. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1211107>.
5. Fernandez-Armenta J, Soto-Iglesias D, Silva E, et al. Safety and outcomes of ventricular tachycardia substrate ablation during sinus rhythm: A prospective multicenter registry. *JACC Clin Electrophysiol.* 2020 Nov;6(11): 1435-48. <https://doi.org/10.1016/j.jacep.2020.07.028>.
6. Ciaccio EJ, Anter E, Coromilas J, et al. Structure and function of the ventricular tachycardia isthmus. *Heart Rhythm.* 2022 Jan;19(1): 137-53. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2021.08.001>.
7. Wei C, Qian P, Tedrow U, et al. Non-invasive stereotactic radioablation: a new option for the treatment of ventricular arrhythmias. *Arrhythm Electrophysiol Rev.* 2020 Dec;8(4): 285-93. <https://doi.org/10.15420/aer.2019.04>.
8. Whitaker J, Mak RH, Zei PC. Non-invasive ablation of arrhythmias with stereotactic ablative radiotherapy. *Trends Cardiovasc Med.* 2022 Jul;32(5): 287-96. <https://doi.org/10.1016/j.tcm.2021.04.008>.
9. Bonaparte I, Gregucci F, Surgo A, et al. Linac-based STereotactic Arrhythmia Radioablation (STAR) for ventricular tachycardia: a treatment planning study. *Jpn J Radiol.* 2021 Dec;39(12): 1223-8. <https://doi.org/10.1007/s11604-021-01159-9>.
10. Zeppenfeld K, Tfelt-Hansen J, de Riva M, et al. 2022 ESC Guidelines for the management of patients with ventricular arrhythmias and the prevention of sudden cardiac death. *Eur Heart J.* 2022 Oct;43(40): 3997-4126. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehac262>.
11. Al-Khatib SM, Stevenson WG, Ackerman MJ, et al. 2017 AHA/ACC/HRS guideline for management of patients with ventricular arrhythmias and the prevention of sudden cardiac death: A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice guidelines and the Heart Rhythm Society. *Circulation.* 2018 Sep;138(13): e272-e391. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000549>.
12. Guckenberger M, Baus WW, Blanck O, et al. Definition and quality requirements for stereotactic radiotherapy: Consensus statement from the DEGRO/DGMP Working Group Stereotactic Radiotherapy and Radiosurgery. *Strahlenther Onkol.* 2020 May;196(5): 417-20. <https://doi.org/10.1007/s00066-020-01603-1>.
13. Schmitt D, Blanck O, Gauer T, et al. Technological quality requirements for stereotactic radiotherapy: Expert review group consensus from the DGMP Working Group for Physics and Technology in Stereotactic Radiotherapy. *Strahlenther Onkol.* 2020 May;196(5): 421-43. <https://doi.org/10.1007/s00066-020-01583-2>.
14. Sanuki N, Takeda A, Tsurugai Y, et al. Role of stereotactic body radiotherapy in multidisciplinary management of liver metastases in patients with colorectal cancer. *Jpn J Radiol.* 2022 Oct;40(10): 1009-16. <https://doi.org/10.1007/s11604-022-01307-9>.
15. Ito K, Nakajima Y, Ikuta S. Stereotactic body radiotherapy for spinal oligometastases: a review on patient selection and the optimal methodology. *Jpn J Radiol.* 2022 Oct;40(10): 1017-23. <https://doi.org/10.1007/s11604-022-01277-y>.
16. Kimura T, Fujiwara T, Kameoka T, et al. Stereotactic body radiation therapy for metastatic lung metastases. *Jpn J Radiol.* 2022 Oct;40(10): 995-1005. <https://doi.org/10.1007/s11604-022-01323-9>.
17. Timmerman R. A story of hypofractionation and the table on the wall. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2022 Jan;112(1): 4-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2021.09.027>.
18. Diez P, Hanna GG, Aitken KL, et al. UK 2022 consensus on normal tissue dose-volume constraints for oligometastatic, primary lung and hepatocellular carcinoma stereotactic ablative radiotherapy. *Clin Oncol (R Coll Radiol).* 2022 May;34(5): 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.clon.2022.02.010>.
19. Cuculich PS, Schill MR, Kashani R, et al. Noninvasive Cardiac Radiation for Ablation of Ventricular Tachycardia. *N Engl J Med.* 2017 Dec;377(24): 2325-36. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1613773>.
20. Hašková J, Wichterle D, Kautzner J, et al. Efficacy and safety of stereotactic radiotherapy in patients with recurrent ventricular tachycardias: the Czech experience. *JACC Clin Electrophysiol.* 2024 Apr;10(4): 654-66. <https://doi.org/10.1016/j.jacep.2023.12.002>.
21. Van der Ree MH, Blanck O, Limpens J, et al. Cardiac radioablation- A systematic review. *Heart Rhythm.* 2020 Aug;17(8): 1381-92. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2020.03.013>.
22. Kovacs B, Mayinger M, Schindler M, et al. Stereotactic radioablation of ventricular arrhythmias in patients with structural heart disease – A systematic review. *Radiother Oncol.* 2021 Jul;160: 132-9. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2021.06.036>.
23. Miszczyk M, Jadczyk T, Goba K, et al. Clinical evidence behind stereotactic radiotherapy for the treatment of ventricular tachycardia (STAR) –A comprehensive review. *J Clin Med.* 2021 Mar;10(6): 1238. <https://doi.org/10.3390/jcm10061238>.
24. Lee E, Ibrahim EH, Parwani P, et al. Practical guide to evaluating myocardial disease by cardiac MRI. *Am J Roentgenol.* 2020 Mar;214(3): 546-56. <https://doi.org/10.2214/AJR.19.22076>.
25. Zhang DM, Navara R, Yin T, et al. Cardiac radiotherapy induces electrical conduction reprogramming in the absence of transmural fibrosis. *Nat Commun.* 2021 Sep;12(1): 5558. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25730-0>.
26. Amino M, Yoshioka K, Tanabe T, et al. Heavy ion radiation up-regulates Cx43 and ameliorates arrhythmogenic substrates in hearts after myocardial infarction. *Cardiovasc Res.* 2006 Nov;72(2): 412-21. <https://doi.org/10.1016/j.cardiores.2006.09.010>.
27. Mehrhof F, Hüttemeister J, Tanacli R, et al. Cardiac radiotherapy transiently alters left ventricular electrical properties and induces cardiomyocyte-specific ventricular substrate changes in heart failure. *Europace.* 2024 Jan;26(1): euae005. <https://doi.org/10.1093/europace/euae005>.
28. Glashan CA, Androulakis AFA, Tao Q, et al. Whole human heart histology to validate electroanatomical voltage mapping in patients with non-ischaemic cardiomyopathy and ventricular tachycardia. *Eur Heart J.* 2018 Jul;39(30): 2867-75. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy168>.
29. De Bakker JM, van Capelle FJ, Janse MJ, et al. Slow conduction in the infarcted human heart: 'Zigzag' course of activation. *Circulation.* 1993 Sep;88(3): 915-26. <https://doi.org/10.1161/01.cir.88.3.915>.

doi.org/10.1161/01.cir.88.3.915.

30. Sharma A, Wong D, Weidlich G, et al. Noninvasive stereotactic radiosurgery (CyberHeart) for creation of ablation lesions in the atrium. *Heart Rhythm*. 2010 Jun;7(6): 802-10. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2010.02.010>.
31. Blanck O, Bode F, Gebhard M, et al. Dose-escalation study for cardiac radiosurgery in a porcine model. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2014 Jul;89(3): 590-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2014.02.036>.
32. Cha MJ, Seo JW, Kim HJ, et al. Early changes in rat heart after high-dose irradiation: implications for antiarrhythmic effects of cardiac radioablation. *J Am Heart Assoc*. 2021 May;10(9): e019072. <https://doi.org/10.1161/JAHA.120.019072>.
33. Suzuki A, Deisher AJ, Rettmann ME, et al. Catheter-free arrhythmia ablation using scanned proton beams: electrophysiologic outcomes, biophysics, and characterization of lesion formation in a porcine model. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2020 Sep;13(9): e008838. <https://doi.org/10.1161/CIRCEP.120.008838>.
34. Hohmann S, Deisher AJ, Konishi H, et al. Catheter-free ablation of infarct scar through proton beam therapy: tissue effects in a porcine model. *Heart Rhythm*. 2020 Dec;17(12): 2190-9. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2020.07.011>.
35. Lehmann HI, Graeff C, Simoniello P, et al. Feasibility study on cardiac arrhythmia ablation using high-energy heavy ion beams. *Sci Rep*. 2016 Dec;6: 38895. <https://doi.org/10.1038/srep38895>.
36. Amino M, Yoshioka K, Furusawa Y, et al. Inducibility of ventricular arrhythmia 1 year following treatment with heavy ion irradiation in dogs with myocardial infarction. *Pacing Clin Electrophysiol*. 2017 Mar;40(3): 379-90. <https://doi.org/10.1111/pace.13031>.
37. Hohmann S, Deisher AJ, Suzuki A, et al. Left ventricular function after noninvasive cardiac ablation using proton beam therapy in a porcine model. *Heart Rhythm*. 2019 Oct;16(10): 1710-9. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2019.04.030>.
38. Pérez-Castellano N, Villacastín J, Aragoncillo P, et al. Pathological effects of pulmonary vein beta-radiation in a swine model. *J Cardiovasc Electrophysiol*. 2006 Jun;17(6): 662-9. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8167.2006.00462.x>.
39. Bode F, Blanck O, Gebhard M, et al. Pulmonary vein isolation by radiosurgery: implications for non-invasive treatment of atrial fibrillation. *Europace*. 2015 Dec;17(12): 1868-74. <https://doi.org/10.1093/europace/euu406>.
40. Васковский ВА, Таймасова ИА, Калинин ДВ, и др. Применение стереотаксической радиохирургии в эксперименте на крупных животных для проведения неинвазивных вмешательств в аритмологии. *Вестник аритмологии*. 2021;28(1):5-13. [Vaskovskiy VA, Taymasova IA, Kalinin DV, et al. Experimental use of stereotactic radiosurgery for non-invasive interventions in arrhythmology. *Journal of Arrhythmology*. 2021;28(1): 5-13. (In Russ.)] <https://doi.org/10.35336/VA-2021-1-5-13>.
41. Kovacs B, Mayinger M, Ehrbar S, et al. Dose escalation for stereotactic arrhythmia radioablation of recurrent ventricular tachyarrhythmia—a phase II clinical trial. *Radiat Oncol*. 2023 Nov;18(1): 185. <https://doi.org/10.1186/s13014-023-02361-x>.
42. Gupta S, Desjardins B, Baman T, et al. Delayed-enhanced MR scar imaging and intraprocedural registration into an electroanatomical mapping system in post-infarction patients. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2012 Feb;5(2): 207-10. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2011.08.021>.
43. Piers SRD, Tao Q, de Riva Silva M, et al. CMR-based identification of critical isthmus sites of ischemic and nonischemic ventricular tachycardia. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2014 Jul;7(7): 774-84. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2014.03.013>.
44. Yamashita S, Sacher F, Mahida S, et al. Image integration to guide catheter ablation in scar-related ventricular tachycardia. *J Cardiovasc Electrophysiol*. 2016 Jun;27(6): 699-708. <https://doi.org/10.1111/jce.12963>.
45. Codreanu A, Odille F, Aliot E, et al. Electroanatomic characterization of post-infarct scars: comparison with 3-dimensional myocardial scar reconstruction based on magnetic resonance imaging. *J Am Coll Cardiol*. 2008 Aug;52(10): 839-42. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2008.05.038>.
46. Dickfeld T, Tian J, Ahmad G, et al. MRI-guided ventricular tachycardia ablation: integration of late gadolinium-enhanced 3D scar in patients with implantable cardioverter-defibrillators. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2011 Apr;4(2): 172-84. <https://doi.org/10.1161/CIRCEP.110.958744>.
47. Sasaki T, Miller CF, Hansford R, et al. Myocardial structural associations with local electrograms: a study of postinfarct ventricular tachycardia pathophysiology and magnetic resonance-based noninvasive mapping. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2012 Dec;5(6): 1081-90. <https://doi.org/10.1161/CIRCEP.112.970699>.
48. Grehn M, Mandija S, Miszczyk M, et al. STereotactic Arrhythmia Radioablation (STAR): the Standardized Treatment and Outcome Platform for Stereotactic Therapy Of Re-entrant tachycardia by a Multidisciplinary consortium (STOPSTORM.eu) and review of current patterns of STAR practice in Europe. *Europace*. 2023 Apr;25(4): 1284-95. <https://doi.org/10.1093/europace/eauc238>.
49. Krug D, Blanck O, Andratschke N, et al. Recommendations regarding cardiac stereotactic body radiotherapy for treatment-refractory ventricular tachycardia. *Heart Rhythm*. 2021 Dec;18(12): 2137-45. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2021.08.004>.
50. Cerqueira MD, Weissman NJ, Dilsizian V, et al. Standardized myocardial segmentation and nomenclature for tomographic imaging of the heart. A statement for health-care professionals from the cardiac imaging Committee of the Council on Clinical Cardiology of the American Heart Association. *Circulation*. 2002 Jan;105(4): 539-42. <https://doi.org/10.1161/hc0402.102975>.
51. Haberl C, Crean AM, Zelt JGE, et al. Role of nuclear imaging in cardiac stereotactic body radiotherapy for ablation of ventricular tachycardia. *Semin Nucl Med*. 2024 Jul;54(4): 427-37. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2024.03.002>.
52. Amino M, Kabuki S, Kunieda E, et al. Interim report of a Japanese phase II trial for cardiac stereotactic body radiotherapy in refractory ventricular tachycardia - focus on target determination. *Circ Rep*. 2023 Jan;5(2): 69-79. <https://doi.org/10.1253/circrep.CR-23-0003>.
53. Gimelli A, Menichetti F, Soldati E, et al. Predictors

- of ventricular ablation's success: viability, innervation, or mismatch? *J Nucl Cardiol*. 2021 Feb;28(1): 175-83. <https://doi.org/10.1007/s12350-018-01575-x>.
54. Loo BW Jr, Soltys SG, Wang L, et al. Stereotactic ablative radiotherapy for the treatment of refractory cardiac ventricular arrhythmia. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2015 Aug;8(4): 748-50. <https://doi.org/10.1161/CIRCEP.115.002765>.
55. Robinson CG, Samson PP, Moore KMS, et al. Phase I/II trial of electrophysiology-guided noninvasive cardiac radioablation for ventricular tachycardia. *Circulation*. 2019 Jan;139(3): 313-21. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.118.038261>.
56. Bernstein HM, Leon W, Daly ME, et al. Noninvasive stereotactic radiation for refractory ventricular tachycardia after failure of cardiac sympathetic denervation. *JACC Case Rep*. 2022 Aug;4(15): 1189-94. <https://doi.org/10.1016/j.jaccas.2022.06.025>.
57. Wight J, Bigham T, Schwartz A, et al. Long term follow-up of stereotactic body radiation therapy for refractory ventricular tachycardia in advanced heart failure patients. *Front Cardiovasc Med*. 2022 May;9: 849113. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.849113>.
58. Yugo D, Lo LW, Wu YH, et al. Case series on stereotactic body radiation therapy in non-ischemic cardiomyopathy patients with recurrent ventricular tachycardia. *Pacing Clin Electrophysiol*. 2021 Jul;44(7): 1085-93. <https://doi.org/10.1111/pace.14254>.
59. Boda-Heggemann J, Blanck O, Mehrhof F, et al. Interdisciplinary clinical target volume generation for cardiac radioablation: multicenter benchmarking for the RAdio-surgery for VENTricular TACHycardia (RAVENTA) trial. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2021 Apr;110(3): 745-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2021.01.028>.
60. Esposito A, Palmisano A, Antunes S, et al. Cardiac CT with delayed enhancement in the characterization of ventricular tachycardia structural substrate: relationship between CT-segmented scar and electro-anatomic mapping. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2016 Jul;9(7): 822-32. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2015.10.024>.
61. Macias C, Nakamura K, Tung R, et al. Importance of delayed enhanced cardiac MRI in idiopathic RVOT-VT: differentiating mimics including early stage ARVC and cardiac sarcoidosis. *J Atr Fibrillation*. 2014 Jun;7(1): 1097. <https://doi.org/10.4022/jafb.1097>.
62. Tatsugami F, Higaki T, Sakane H, et al. Coronary CT angiography in patients with implanted cardiac devices: initial experience with the metal artefact reduction technique. *Br J Radiol*. 2016 Oct;89(1066): 20160493. <https://doi.org/10.1259/bjr.20160493>.
63. Liang J, Sun Y, Ye Z, et al. Second-generation motion correction algorithm improves diagnostic accuracy of single-beat coronary CT angiography in patients with increased heart rate. *Eur Radiol*. 2019 Aug;29(8): 4215-27. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5929-6>.
64. Matsumoto Y, Fujioka C, Yokomachi K, et al. Feasibility of deep learning-based image reconstruction for improving image quality in coronary computed tomography angiography. *Sci Rep*. 2023 Mar;13(1): 3636. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30786-7>.
65. Tatsugami F, Higaki T, Nakamura Y, et al. Deep learning-based image restoration algorithm for coronary CT angiography. *Eur Radiol*. 2019 Nov;29(10): 5322-9. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06183-y>.
66. De Santis D, Polidori T, Tremamunno G, et al. Deep learning image reconstruction algorithm: impact on image quality in coronary computed tomography angiography. *Radiol Med*. 2023 Jun;128(6): 434-44. <https://doi.org/10.1007/s11547-023-01607-8>.
67. Chen X, Mumme RP, Corrigan KL, et al. Deep learning-based automatic segmentation of cardiac substructures for lung cancers. *Radiother Oncol*. 2024 Feb;191: 110061. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2023.110061>.
68. Wong LM, Ai QYH, Mo FKF, et al. Convolutional neural network in nasopharyngeal carcinoma: how good is automatic delineation for primary tumor on a non-contrast-enhanced fat-suppressed T2-weighted MRI? *Jpn J Radiol*. 2021 May;39(5): 571-9. <https://doi.org/10.1007/s11604-021-01092-x>.
69. Esquivel A, Ferrero A, Mileto A, et al. Photon-Counting Detector CT: Key Points Radiologists Should Know. *Korean J Radiol*. 2022 Sep;23(9): 854-65. <https://doi.org/10.3348/kjr.2022.0377>.
70. Greffier J, Villani N, Defez D, et al. Spectral CT imaging: Technical principles of dual-energy CT and multi-energy photon-counting CT. *Diagn Interv Imaging*. 2023 Apr;104(4): 167-77. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2022.11.003>.
71. Zeppenfeld K, Rademaker R, Al-Ahmad A, et al. Patient selection, ventricular tachycardia substrate delineation, and data transfer for stereotactic arrhythmia radioablation: a clinical consensus statement of the European Heart Rhythm Association of the European Society of Cardiology and the Heart Rhythm Society. *EP Europace*. 2025 Apr;27(4): euae214. <https://doi.org/10.1093/europace/euae214>.
72. Weidlich GA, Hacker F, Bellezza D, et al. Ventricular tachycardia: a treatment comparison study of the CyberKnife with conventional linear accelerators. *Cureus*. 2018 Oct;10(10): e3445. <https://doi.org/10.7759/cureus.3445>.
73. Benedict SH, Yenice KM, Followill D, et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM task group 101. *Med Phys*. 2010 Aug;37(8): 4078-101. <https://doi.org/10.1118/1.3438081>.
74. Banfill K, Giuliani M, Aznar M, et al. Cardiac toxicity of thoracic radiotherapy: existing evidence and future directions. *J Thorac Oncol*. 2021 Feb;16(2): 216-27. <https://doi.org/10.1016/j.jtho.2020.11.002>.
75. Reis CQM, Cross A, Borsavage JM, et al. Feasibility of volumetric-modulated arc therapy gating for cardiac radioablation using real-time ECG signal acquisition and a dynamic phantom. *Med Phys*. 2025 Mar;52(3): 1758-68. <https://doi.org/10.1002/mp.17582>.
76. Piccolo C, Vigorito S, Rondi E, et al. Phantom study of stereotactic radioablation for ventricular tachycardia (STRA-MI-VT) using Cyberknife Synchrony Respiratory Tracking System with a single fiducial marker. *Phys Med*. 2022 Aug;100: 135-41. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.06.019>.
77. Ho LT, Chen JL, Hsu JC, et al. Long-term results of stereotactic arrhythmia radioablation for refractory ven-

- tricular Arrhythmias-A Taiwanese population study. *J Formos Med Assoc.* 2024 Dec;S0929-6646(24)00550-3. <https://doi.org/10.1016/j.jfma.2024.11.013>.
78. Robinson CG, Samson P, Moore KMS, et al. Longer term results from a phase I/II Study of EP-guided non-invasive cardiac radioablation for treatment of ventricular tachycardia (ENCORE-VT). *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2019 Nov;105(3): 682. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2019.08.032>.
79. Trojani V, Grehn M, Botti A, et al. Refining Treatment Planning in STereotactic Arrhythmia Radioablation: Benchmark Results and Consensus Statement From the STOPSTORM.eu Consortium. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2025 Jan;121(1): 218-29. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2024.07.2331>.
80. Gupta A, Sattar Z, Chaaban N, et al. Stereotactic cardiac radiotherapy for refractory ventricular tachycardia in structural heart disease patients: a systematic review. *Europace.* 2024 Dec;27(1): euae305. <https://doi.org/10.1093/europace/euae305>.
81. Haskova J, Jedlickova K, Cvek J, et al. Oesophago-pericardial fistula as a late complication of stereotactic radiotherapy for recurrent ventricular tachycardia. *Europace.* 2022 May;24(5):969. <https://doi.org/10.1093/europace/euab326>.
82. Benali K, Zei PC, Lloyd M, et al. One-year mortality and causes of death after stereotactic radiation therapy for refractory ventricular arrhythmias: a systematic review and pooled analysis. *Trends Cardiovasc Med.* 2024 Jul;34(5): 488-96. <https://doi.org/10.1016/j.tcm.2023.12.008>.
83. Ревишвили АШ, Васковский ВА, Артюхина ЕА, и др. Применение стереотаксической радиоабляции в клинической практике для лечения пациента с желудочковой тахикардией: клиническое наблюдение. *Вестник аритмологии.* 2022;29(4): 66-72. [Revishvili ASH, Vaskovsky VA, Artyukhina EA, Taymasova IA, Golanov AV, Antipina NA, Nikolayeva AA, Kondratyev EV, Usachev DYU. Stereotactic radioablation in clinical practice for the treatment of a patient with ventricular tachycardia: case report. *Journal of Arrhythmology.* 2022; 29(4): 66-72. (In Russ.)] <https://doi.org/10.35336/VA-2022-4-10>.
84. Gianni C, Rivera D, Burkhardt JD, et al. Stereotactic arrhythmia radioablation for refractory scar-related ventricular tachycardia. *Heart Rhythm.* 2020 Aug;17(8): 1241-8. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2020.02.036>.
85. Carbucicchio C, Andreini D, Piperno G, et al. Stereotactic radioablation for the treatment of ventricular tachycardia: preliminary data and insights from the STRA-MI-VT phase Ib/II study. *J Interv Card Electrophysiol.* 2021 Nov;62(2): 427-39.
86. Ninni S, Gallot-Lavallée T, Klein C, et al. Stereotactic radioablation for ventricular tachycardia in the setting of electrical storm. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2022 Jun;15(6): e010955. <https://doi.org/10.1007/s10840-021-01060-5>.
87. Wang K, Eblan MJ, Deal AM, et al. Cardiac toxicity after radiotherapy for stage III non-small-cell lung cancer: pooled analysis of dose-escalation trials delivering 70 to 90 Gy. *J Clin Oncol.* 2017 May;35(13): 1387-94. <https://doi.org/10.1200/JCO.2016.70.0229>.
88. Bradley JD, Paulus R, Komaki R, et al. Standard-dose versus high-dose conformal radiotherapy. *Lancet Oncol.* 2015 Feb;16(2): 187-99. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(14\)71207-0](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(14)71207-0).
89. Herrera Siklody C, Schiappacasse L, Jumeau R, et al. Recurrences of ventricular tachycardia after stereotactic arrhythmia radioablation arise outside the treated volume: analysis of the Swiss cohort. *Europace.* 2023;25: eua268. <https://doi.org/10.1093/europace/eua268>.
90. Kong FM, Moiseenko V, Zhao J, et al. Organs at risk considerations for thoracic stereotactic body radiation therapy: what is safe for lung parenchyma? *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2021 May;110(1): 172-87. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2018.11.028>.
91. Nuytens JJ, Moiseenko V, McLaughlin M, et al. Esophageal dose tolerance in patients treated with stereotactic body radiation therapy. *Semin Radiat Oncol.* 2016;26(2): 120-8. <https://doi.org/10.1016/j.semradonc.2015.11.006>.
92. Van der Ree MH, Luca A, Herrera Siklody C, et al. Effects of stereotactic arrhythmia radioablation on left ventricular ejection fraction and valve function over time. *Heart Rhythm.* 2023 Sep;20(9): 1206-7. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2023.05.022>.
93. Van der Ree MH, Hoeksema WF, Luca A, et al. Stereotactic arrhythmia radioablation: a multicenter pre-post intervention safety evaluation of the implantable cardioverter-defibrillator function. *Radiother Oncol.* 2023 Dec;189: 109910. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2023.109910>.
94. Blanck O, Buergy D, Vens M, et al. Radiosurgery for ventricular tachycardia: preclinical and clinical evidence and study design for a German multi-center multi-platform feasibility trial (RAVENTA). *Clin Res Cardiol.* 2020;109(11): 1319-32. <https://doi.org/10.1007/s00392-020-01650-9>.
95. Nagashima K, Choi EK, Tedrow UB, et al. Reentrant Ventricular Tachycardia Originating From the Aortic Root in Patients Without Overt Structural Heart Disease. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2014 Oct;7(5): 883-8. <https://doi.org/10.1161/CIRCEP.113.000870>.
96. Sapp JL, Wells GA, Parkash R, et al. Ventricular Tachycardia Ablation versus Escalation of Antiarrhythmic Drugs. *N Engl J Med.* 2016 Jul;375(2): 111-21. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1513614>.
97. Virk SA, Kumar S. Catheter Ablation of Ventricular Tachycardia in Patients With Structural Heart Disease: A Meta-Analysis. 2023 Feb;9(2): 255-7.
98. Reddy RK, Howard JP, Ahmad Y, et al. Cardiac Stereotactic Ablative Radiotherapy for Ventricular Tachycardia: State of the Art Review. *Arrhythm Electrophysiol Rev.* 2023 May;12: e26. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2021-001770>.
99. Таймасова ИА, Васковский ВА, Артюхина ЕА, и др. Возможности и перспективы применения стереотаксической радиохирургии для проведения неинвазивных вмешательств в аритмологии. *Вестник аритмологии.* 2020;27(4):33-41. [Taymasova IA, Vaskovskiy VA, Artukhina EA, et al. Opportunities and perspectives of stereotactic radiosurgery for non-invasive arrhythmology interventions. *Journal of Arrhythmology.* 2020;27(4): 33-41. (In Russ.)] <https://doi.org/10.35336/VA-2020-4-33-41>.