



УДК 616.1

DOI 10.17802/2306-1278-2024-13-2-116-127

## СТЕРЕОТАКСИЧЕСКАЯ РАДИОАБЛАЦИЯ КАК НЕИНВАЗИВНЫЙ МЕТОД ЛЕЧЕНИЯ ФИБРИЛЛЯЦИИ ПРЕДСЕРДИЙ

Е.Д. Стребкова<sup>1</sup>, Е.А. Артюхина<sup>1,2</sup>, А.Ш. Ревিশвили<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А.В. Вишневского» Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Большая Серпуховская, 27, Москва, Российская Федерация, 115093; <sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Баррикадная, 2/1, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 125993

### Основные положения

• В течение последнего времени активно изучаются возможность применения стереотаксической радиоабляции при лечении аритмий. Стереотаксическая радиоабляция является инновационным методом неинвазивного лечения устойчивых аритмий у пациентов высокого риска. Комплексный анализ преимуществ и недостатков данной технологии при лечении ФП позволит оценить перспективы ее развития.

### Резюме

Фибрилляция предсердий является наиболее распространенной тахикардией. Распространенность данной аритмии вследствие стремительного демографического старения населения продолжает неуклонно увеличиваться. Помимо этого, ФП часто страдают пациенты с сопутствующими онкологическими заболеваниями. Несмотря на относительно доброкачественное течение, ФП служит фактором риска развития ряда жизнеугрожающих и инвалидизирующих осложнений, что существенно снижает качество жизни и увеличивает расходы системы здравоохранения. Длительное время неинвазивные методы лечения ФП были представлены исключительно антиаритмической терапией. Важно отметить, что у пожилых и онкологических пациентов даже пароксизмальная форма ФП тяжело поддается медикаментозному лечению, а катетерные абляции и хирургическое вмешательство сопряжены с высокими рисками процедуральных и ранних послеоперационных осложнений. Все это способствовало поиску неинвазивных методов абляции аритмогенных субстратов ФП. Впервые в клинической практике стереотаксическая радиоабляция применена для устранения устойчивых желудочковых тахикардий. Накопив достаточный опыт, ученые рассмотрели возможность применения данной неинвазивной терапии в отношении пациентов с ФП. В настоящее время в литературе представлены единичные работы и серии клинических наблюдений, посвященные оценке эффективности и безопасности стереотаксической радиоабляции в лечении ФП. Основная цель представленного литературного обзора заключалась в освещении актуальных данных о возможностях и ограничениях неинвазивной радиотоксической стереоабляции в отношении больных ФП.

### Ключевые слова

Фибрилляция предсердий • Стереотаксическая радиоабляция • Пожилые пациенты • Онкология

Поступила в редакцию: 08.04.2024; поступила после доработки: 14.05.2024; принята к печати: 31.05.2024

## STEREOTACTIC RADIOABLATION AS A NON-INVASIVE APPROACH IN THE TREATMENT OF PERSISTENT ATRIAL FIBRILLATION

E.D. Strebkova<sup>1</sup>, E.A. Artyukhina<sup>1,2</sup>, A.Sh. Revishvili<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution "A.V. Vishnevskiy National Medical Research Center of Surgery" of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, 27, Bolshaya Serpukhovskaya St., Moscow, Russian Federation, 115093; <sup>2</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education "Russian Medical Academy of Continuous Professional Education" of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, 2/1, Barricadnaya St., bld. 1, Moscow, Russian Federation, 125993

Для корреспонденции: Елизавета Дмитриевна Стребкова, elizabeth.strebkova@yandex.ru; адрес: ул. Большая Серпуховская, 27, Москва, Российская Федерация, 115093

Corresponding author: Elizaveta D. Strebkova, elizabeth.strebkova@yandex.ru; address: 27, Bolshaya Serpukhovskaya St., Moscow, Russian Federation, 115093

**Highlights**

• The feasibility and safety of stereotactic radioablation of arrhythmias have been actively investigated over the last few years. Stereotactic radioablation is an innovative approach for the noninvasive treatment of sustained arrhythmias in high-risk patients. A comprehensive analysis of the advantages and disadvantages of this STAR in relation to AF will allow us to assess the future prospects for the development of this area.

**Abstract**

Atrial fibrillation is the most common tachyarrhythmia. The prevalence of this arrhythmia continues to increase steadily due to the rapid demographic ageing of the population. In addition, patients with concomitant cancer are often affected by AF. Despite the relatively benign course of AF, this arrhythmia is a risk factor for the development of a number of life-threatening and disabling complications, which significantly reduces the quality of life and increases the costs to the health care system. For a long time, non-invasive methods of AF treatment were represented exclusively by antiarrhythmic therapy. It is important to note that in elderly and oncological patients, even paroxysmal AF is difficult to treat with medication, and catheter ablation and surgery are associated with high risks of procedural and early postoperative complications. All this served to search for noninvasive methods of ablation of arrhythmogenic substrates of AF. For the first time, stereotactic radioablation was used in clinical practice to eliminate sustained ventricular tachyarrhythmias. Having accumulated sufficient experience, the scientists decided to consider the application of this non-invasive therapy in patients with AF. Currently, there are sporadic papers and clinical case series highlighting the efficacy and safety of stereotactic radioablation in the treatment of AF. The main aim of the presented literature review was to highlight recent data on the capabilities and limitations of non-invasive radiotoxic stereoablation in patients with AF.

**Keywords**

Atrial fibrillation • Stereotactic radioablation • Older patients • Oncology

*Received: 08.04.2024; received in revised form: 14.05.2024; accepted: 31.05.2024*

**Список сокращений**

|                              |  |
|------------------------------|--|
| АВ – атриовентрикулярный     | ЛП – левое предсердие  |
| ЖТ – желудочковые тахикардии | МРТ – магнитно-резонансная томография  |
| КА – катетерная абляция      | СРАА – стереотаксическая радиоабляция аритмий (stereotactic arrhythmia radio ablation, STAR) |
| ЛВ – легочные вены           | ФП – фибрилляция предсердий  |
| ЛЖ – левый желудочек         |  |

**Введение**

Фибрилляция предсердий (ФП) является наиболее распространенной тахикардией: частота ее встречаемости в общей популяции составляет 1–2% среди всех сердечных аритмий [1–3]. Вследствие стремительного демографического старения населения продолжается неуклонный рост больных ФП во всем мире. Считается, что к 2060 г. данным заболеванием будут страдать ~18 млн жителей Европы [4]. В России встречаемость ФП в возрастной группе старше 70 лет выше, чем среди людей 50–69 лет, в 1,6–5,3 раза [5].

Частота возникновения ФП связана не только со старением населения, но и с онкологическими заболеваниями. ФП, ассоциированная с медикаментозным лечением онкологии, составляет 3,7 на 1 000 человек в год [6]. Несмотря на относительно

доброкачественное течение, данная аритмия является фактором риска развития тромбоэмболических осложнений, а в ряде случаев ассоциирована с аритмогенными кардиомиопатиями, хронической сердечной недостаточностью с возможным исходом в аритмогенный коллапс [1, 7]. Все это приводит к снижению качества жизни, увеличению инвалидизации и смертности населения [8]. Расходы системы здравоохранения на решение этой проблемы высокие [9].

Неинвазивные методы лечения и профилактики осложнений ФП продолжительное время были представлены исключительно медикаментозной терапией. Ее эффективность, обоснованность и безопасность остается дискуссионной в отношении пациентов разной возрастной группы и зависит от общей продолжительности ФП. Так, у пожилых

пациентов даже пароксизмальная форма ФП тяжело поддается медикаментозному лечению и может сопровождаться нарушением атриовентрикулярной (АВ) проводимости, развитием синдромов слабости синусового узла и тахи-бради, нарушением внутрижелудочковой проводимости [1].

Благодаря работе M. Haïssaguerre и соавт. [10] было установлено, что основной мишенью при ФП следует считать легочные вены (ЛВ). На основании данных последующих работ к этой мишени была добавлена задняя стенка левого предсердия (ЛП) [11]. Хирургические, торакоскопические, гибридные методы лечения, несмотря на высокую эффективность в отдаленном периоде наблюдения, являются травматичными и сопряжены со значительными рисками интраоперационных осложнений даже в руках опытного хирурга [3, 7, 12].

Также, несмотря на стремительное развитие интервенционной кардиологии, эффективность однократных катетерных абляций (КА) в течение нескольких лет снижается до 40% [13]. Кроме того, с учетом инвазивности данных вмешательств сохраняются риски интраоперационных осложнений, которые могут приводить к летальным исходам. Основные осложнения, ассоциированные с КА, включают жизнеугрожающие (перипроцедуральная летальность < 0,1%, атриозофагеальный свищ/перфорация < 0,5%, тромбоз эмболии < 1,0%, тампонада/перфорация сердца ~1%) и средние (стеноз легочных вен < 1,0%, парез диафрагмального нерва < 1,0%, сосудистые осложнения 2–4%) осложнения, на долю малых осложнений приходится 1–2%; частота бессимптомных церебральных эмболий составляет 5–15% [1]. Риски осложнений увеличиваются у пациентов старших возрастных групп и при наличии тяжелых сопутствующих заболеваний [14, 15]. В связи с чем остается актуальным поиск неинвазивных высокоэффективных методов лечения ФП.

Первые успешные опыты применения лучевой терапии в эксперименте на лабораторных животных по деструкции АВ-соединения показали многообещающие результаты. Оказалось, что доставляемые протоны способны эффективно воздействовать на проводящую систему сердца [16–18]. Направленность и механизм действия стереотаксической радиотерапии тела заключается в повреждении клеток с формированием фиброзных изменений в локальной области воздействия аналогично катетерным и хирургическим методам абляции. В отличие от стандартных процедур КА, которые дают немедленные результаты, при стереотаксической радиотерапии тела требуется время, иногда до нескольких месяцев [16, 17, 19]. Радиотерапию начали внедрять в аритмологию для лечения устойчивых желудочковых тахикардий (ЖТ). По мере накопления опыта учеными было решено рассмотреть возможность применения

данной неинвазивной терапии у пациентов с ФП. В настоящее время в литературе представлены единичные работы и серии клинических наблюдений, освещающие эффективность и безопасность стереотаксической радиоабляции в лечении ФП.

Основной целью представленного литературного обзора явился анализ актуальных данных о возможностях и ограничениях неинвазивной радиотоксической стереоабляции при применении у пациентов с ФП.

### Преคลินิกеские испытания применения СРАА

В течение последнего пятилетия в многочисленных исследованиях изучены возможности стереотаксической радиоабляции аритмий (СРАА): большая часть литературы посвящена лечению ЖТ (преимущественно рецидивирующей) и включает как традиционный линейный ускоритель [11, 20], так и радиохирургический ускоритель «КиберНож» [20–22].

Впервые применение СРАА в эксперименте на лабораторных животных представлено A. Sharma и соавт. [23]. Целевыми участками воздействия являлись кавотрикуспидальный перешеек, АВ-узел, устья ЛВ и ЛП, а также ушко ЛП. Доза облучения составила 25 Гр. Успех лучевой абляции подтвержден двунаправленным блоком проведения в кавотрикуспидальный перешеек и развитием полной АВ-блокады. Также зарегистрировано снижение электрической активности в ЛВ, ЛП и ушке ЛП. Электрофизиологический эффект проявился через 90 дней после процедуры. В гистологических образцах аблатированной ткани визуализированы вакуоли, фиброз и кальциноз. В окружающих тканях изменения отсутствовали [23].

Позже H.I. Lehmann и коллеги [24] выполнили эксперимент на 17 лабораторных животных. Авторы воздействовали на область АВ-узла, правую верхнюю легочную вену, ЛП и левый желудочек (ЛЖ). Использовали три дозы облучения: 25, 40 и 55 Гр. При дозе облучения 25 Гр отмечены незначительные фибротические изменения, в то время как при 40 и 55 Гр – выраженные фибротические изменения. В окружающих тканях повреждений не зарегистрировано. Фракция выброса ЛЖ оставалась сохранной в течение 6-месячного периода наблюдения [24]. В настоящее время проводятся исследования на лабораторных животных по определению доз облучения, эффективных при воздействии на ткань ЛВ и ЛП и безопасных для близлежащих структур. E.A. Gardner и G.A. Weidlich [25] продемонстрировали, что доза излучения, получаемая желудочками при направленном облучении ЛВ, ниже стандартного допустимого порога дозы облучения сердца при однофракционном лечении по звоночника [25]. F. Vode и соавт. [26] в своей работе изолировали ЛВ с помощью стереотаксической радиоабляции на 8 мини-свиньях, дозы облучения

составили от 22,5 до 40 Гр на устье целевой ЛВ. Полная блокада электрической проводимости произошла в группе, получившей 40 Гр. Гистологическое исследование подтвердило трансмуральность циркулярного повреждения устья ЛВ, что обеспечило электрическую изоляцию целевой ЛВ [26].

Р.С. Zei и соавт. [27] оценили безопасность и эффективность СРАА при воздействии на ткани устья ЛВ на экспериментальных моделях (17 взрослых собак и 2 взрослых свиньи) с использованием четырех доз облучения (15, 20, 25 и 35 Гр). Эффект лечения наблюдался для всех ЛВ в группах с дозами облучения 25 и 35 Гр. Два животных подверглись гистопатологическому исследованию, которое показало наличие циркулярного трансмурального рубца в местах абляции устья ЛВ без повреждения окружающих тканей и органов [27].

Впервые на территории нашей страны СРАА применена в эксперименте на четырех свиньях сотрудниками ФГБУ «НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского» Минздрава России и ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н.Н. Бурденко» Минздрава России. С целью облучения использовали линейный ускоритель. Животные были разделены по зонам воздействия: 1-е животное – АВ-узел (доза 35 Гр), 2-е – АВ-узел и верхушка ЛЖ (дозы 40 и 35 Гр соответственно), 3-е – устья ЛВ (доза 30 Гр), 4-е – АВ-узел и свободная стенка ЛЖ (дозы 45 и 40 Гр соответственно) [19]. По данным петлевого регистратора АВ-блокада 3-й степени выявлена у второго и четвертого животных. У первого животного весь период наблюдения нарушений ритма и проводимости не зарегистрировано. У второго животного АВ-блокада 3-й степени имела преходящий характер преимущественно в ночные часы. Четвертое животное погибло на 21-е сут эксперимента от асистолии вследствие развития полной АВ-блокады [18, 19]. При гистологическом исследовании участка, взятого из устьев ЛВ и в толще стенки ЛП, в зоне проведенного воздействия отмечены очаги кальциноза, отек и рыхлая соединительная ткань. Строма миокарда в указанных зонах с очаговым отеком. При исследовании прилежащих к зоне воздействия органов (легкие, пищевод, бифуркационные лимфатические узлы) очагов некроза и фиброза не выявлено (рис. 4). За все время наблюдения у третьего животного (устья ЛВ) нарушений ритма и проводимости не зафиксировано [18].

Доклинические исследования, представленные в нашем обзоре (таблица), проведены на здоровых 53 животных (27 мини-свиней и 26 собак) [23, 27–29]. Средняя доза максимального и минимального облучения составила 25,5 и 36,2 Гр соответственно. Средний период наблюдения – 5,6 мес. Доказанно эффективные дозы облучения были представлены в трех исследованиях: 32,5, 30 и 15–20 Гр. Цель процедуры в исследованиях различалась: в некоторых

работах оценены исключительно левые [30] или правые [31, 32] ЛВ, а в трех исследованиях были рассмотрены все вены [33, 34]. В большинстве случаев животные подвергались общей анестезии и получали абляцию в виде одной фракции, выполняемой с помощью радиохирургического ускорителя «КиберНож». При проведении процедуры с помощью данного ускорителя для достижения максимальной синхронизации в момент подачи терапевтической дозы облучения устанавливались внутрисердечные маркеры (fiducials) [35–37]. В отличие от методов, основанных на линейном ускорителе (стробирование) и свободном дыхании, технология радиохирургического ускорителя «КиберНож» совместно с программой синхронизации обеспечивает точную подачу излучения за счет использования металлических контрольных маркеров (меток). Почти во всех работах учитывались как сердечные, так и дыхательные движения, за исключением J.H. Chang и соавт. [29], которые проводили четырехмерную компьютерную томографию только в случае большой дыхательной амплитуды грудной клетки животного, в остальных случаях – однофазное сканирование.

Р.С. Zei и коллеги [27] рассматривали в качестве мишени только правую верхнюю легочную вену из-за чрезмерной дыхательной подвижности левой верхней легочной вены у собак [27]. Период наблюдения составил от 1 до 6 мес. Эффективность радиотерапевтической абляции, как правило, подтверждалась при дозах облучения до 25–30 Гр. Побочные эффекты (например, бронхемедиастинальный свищ с пневмонией и сепсисом) диагностирован у одной мини-свиньи через месяц после облучения при дозе более 37,5 Гр [27].

Осложнения в доклинических исследованиях: у одного животного после установки внутрисердечного маркера возникла инфекция миокарда [27], у другого – перикардиальный выпот [29]. Легкими побочными эффектами были регургитация митрального клапана после процедуры в одном случае [28] и незначительное снижение фракции выброса ЛЖ [27]. Одно животное умерло из-за перикардита после электрофизиологического исследования [26]. Результаты исследований на животных оценены с помощью электроанатомического картирования, магнитно-резонансной томографии (МРТ) или анатомопатологического исследования [26].

#### Клиническое применение терапии СРАА для лечения ФП

В литературе представлен небольшое количество сообщений о попытках лечения ФП с помощью СРАА, направленное на ЛВ и ЛП [35, 38, 39]. В этих исследованиях пациенты, отказавшиеся от КА, прошли экспериментальное лечение с помощью СРАА.

Первый клинический случай описан Е. Монгоу и соавт. [38]. СРАА была выполнена мужчине 59 лет

Данные лабораторных и клинических исследований СРАА при лечении ФП  
Data from laboratory and clinical studies of STAR in the treatment of AF

| Исследование / Study                                  | Субстрат / Substrate   | Кол-во участников / Number, n                | Доза облучения, Гр / Radiation dose, Gy  | Система / Machine | Период наблюдения, мес. / Follow-up period, month   | Конечные точки / Endpoints  |
|---|--|--|--|-------------------|---|---|
| <b>Лабораторные исследования / Laboratory studies</b> |  |  |  |                   |   |   |
| Blanck O., 2014 [40]                                  | ПВЛВ / RSPV  | 9 мини-свиней / mini-pigs                    | 15–35  | ЛУ / CLI          | 6   | Эффективная доза более 32,5 Гр / Effective dose over 32,5 Gy<br>Токсическое воздействие – нет / Toxic effects – none  |
| Bode F., 2015 [26]                                    | ПВЛВ / RSPV  | 8 мини-свиней / mini-pigs                    | 22,5–40  | ЛУ / CLI          | 6   | Эффективная изоляция ЛВ при дозе более 30 Гр / Effective isolation of PV at dose over 30 Gy<br>Токсическая доза более 37,5 Гр / Toxic dose over 37.5 Gy   |
| Chang J.H., 2021 [29]                                 | Циркулярная абляция ЛП / Circular ablation of the LA   | 7 собак / dogs                               | 33   | ЛУ / CLI          | 2–4   | Эффективность 50% / Efficiency 50%<br>Осложнения – перикардиальный выпот / The complications are pericardial effusion   |
| Gardner E.A., 2012 [28]                               | Устья ЛВ / PV orifices   | 4 собаки и мини-свиньи / dogs and mini-pigs  | 20–35  | КН / CN           | 5   | Эффективность – не оценивали / Efficacy – not evaluated<br>Осложнений – нет / No complications  |
| Maguire P.J., 2011 [41]                               | Устья ЛВ / PV orifices   | 2 мини-свиньи / mini-pigs                    | 25–35  | КН / CN           | 6   | Эффективность – есть / Efficacy – yes<br>Осложнения – митральная регургитация / Complications – mitral regurgitation  |
| Sharma A., 2010 [23]                                  | Левые ЛВ / PV orifices   | 4 мини-свиньи / mini-pigs                    | 38–40  | КН / CN           | 1–6   | Эффективность – есть / Efficacy – yes<br>Осложнения – нет / No complications  |
| Zein P.C., 2018 [27]                                  | ПВЛВ / RSPV  | 17 собак / dogs<br>2 мини-свиньи / mini-pigs | 25–35  | КН / CN           | 3–6   | Эффективная изоляция ЛВ при дозе 15–20 Гр / Effective isolation of PV at dose 15–20 Gy  |
| <b>Клинические исследования / Clinical studies</b>    |  |  |  |                   |   |   |
| Monroy E., 2016 [38]                                  | Структурно нормальное сердце / Structurally normal heart<br>Лекарственно резистентная пароксизмальная ФП / Medication resistant paroxysmal AF<br>Устья ЛВ / PV orifices  | 1  | 25   | КН / CN           | 12  | ФП прогрессировала до постоянной в 6 мес. Фиброз вокруг устьев ЛВ по данным МРТ / Progressed to persistent AF at 6 months. MRI fibrosis around the PV ostia<br>Эффективность – нет / Efficacy – no<br>Осложнений – нет / No complications   |
| Qian P.C., 2020 [39]                                  | Структурно нормальное сердце / Structurally normal heart<br>Лекарственно резистентная пароксизмальная ФП / Medication resistant paroxysmal AF<br>Циркулярная абляция ЛП / Circular ablation of the LA  | 2  | 25   | КН / CN           | Медиана 36 мес. / Median of 36 months   | Один пациент – переход ФП в постоянную форму через 6 мес. / 1 patient – persistent AF after 6 months<br>Один пациент – отсутствие рецидива ФП в течение 24 мес. / 1 patient – no recurrence of AF after 24 months<br>Эффективность – 50% / Efficiency 50%<br>Осложнений – нет / No complications  |
| Shoji M., 2020 [35]                                   | Структурно нормальное сердце / Structurally normal heart<br>Лекарственно резистентная пароксизмальная ФП у онкологических пациентов, которым КА не показана / Drug-resistant paroxysmal AF in cancer patients with cancer contraindication to CA<br>Циркулярная абляция ЛП / Circular ablation of the LA | 3  | 22,4 – 30  | КН / CN           | Медиана 24 мес. / Median of 24 months   | Один пациент умер на 4-й день (не связано с СРАА). Двум пациентам не проведена ЭИТ из-за опасений по поводу безопасности антикоагуляции, и они остались с ФП / 1 patient died on day 4 (not related to STAR). 2 patients did not receive electropulse therapy due to concerns about the safety of anticoagulation and remained with AF<br>Трансэзофагеальная электрофизиологическая оценка показала успешную изоляцию задней стенки ЛП у одного пациента / Transesophageal electrophysiological evaluation showed successful isolation of the posterior wall of the LA in one patient |
| Di Monaco A., 2023 [36]                               | Структурно нормальное сердце / Structurally normal heart<br>Лекарственно резистентная пароксизмальная ФП у пациентов пожилого возраста / Drug-resistant paroxysmal AF in elderly patients  | 18   | Суммарная доза в 1 фракции на ЛВ – 25 Гр / Total dose in 1 fraction per PV – 25 Gy | КН / CN           | Средний период наблюдения 16 мес. (12–23 мес.) / Mean follow-up period 16 months (12–23 months) | Общая эффективность – 67% / Total efficiency 67%  |

**Примечание:** КА – катетерная абляция; КН – радиохирургический ускоритель «КиберНож»; ЛВ – легочные вены; ЛПП – левое предсердие; ЛУ – линейный ускоритель; МРТ – магнитно-резонансная томография; ПВЛВ – правая верхняя легочная вена; СРАА – стереотаксическая радиоабляция аритмий; ФП – фибрилляция предсердий; ЭИТ – электроимпульсная терапия.

**Note:** AF – atrial fibrillation; CA – catheter ablation; CLI – LINear ACcelerator; CN – CyberKnife; LA – left atrial; MRI – magnetic resonance imaging; PV – pulmonary veins; RSPV – right superior pulmonary vein; STAR – stereotactic arrhythmia radio ablation.

с симптоматической ФП, побочными эффектами антиаритмических препаратов и ишемическим инсультом в анамнезе на фоне терапии пероральных антикоагулянтов. В связи с наличием противопоказаний к выполнению КА кардиологом была предложена радиоабляция. Пациенту была проведена терапия СРАА с использованием радиохирургического ускорителя «КиберНож» в одной фракции. Доза облучения ЛВ составила 25 Гр. Сведения об установке внутрисердечного маркера и контроле движения сердца не указаны. Дыхательные движения компенсировались с помощью синхронного наведения изображения в течение всего цикла лечения. Через 6 мес. после процедуры у пациента развилась постоянная ФП, потребовавшая возобновления медикаментозной терапии. Через год после процедуры проведена МРТ, на которой было зафиксировано позднее усиление гадолиния в целевой области радиоабляции, что может соответствовать развитию рубца [38].

Во втором исследовании (P.C. Qian и соавт. [39]) участвовали два пациента с симптоматической ФП, которые отказались от КА и согласились на экспериментальную неинвазивную абляцию. Обоим проведена установка внутрисердечного маркера и выполнена компьютерная томография с контрастным усилением. Доза облучения в обоих случаях составила 25 Гр, использован радиохирургический ускоритель «КиберНож». Пациентов наблюдали в течение 24 (больной № 1) и 48 (больной № 2) мес., осложнения, связанные с лечением, отсутствовали. Через 6 мес. после облучения у первого пациента развилась стойкая ФП, что потребовало возобновления приема антиаритмических препаратов. У второго пациента, напротив, не было рецидивов ФП в течение всего периода наблюдения. Только второму пациенту через год после абляции проведена МРТ до и после абляции, которая показала наличие рубца в области воздействия [39].

M. Shoji и соавт. [35] представили серию клинических наблюдений трех онкологических пациентов с рефрактерной ФП, которые были пролечены целевой дозой 25–30 Гр в одной фракции, доставленной с помощью радиохирургического ускорителя «КиберНож». Абляция ЛП была выполнена по схеме Box lesion. Максимальный период наблюдения составил 24 мес. [35]. Один пациент умер через 4 дня после процедуры вследствие основного заболевания. На аутопсии были обнаружены признаки фибробластов и фиброгенеза в области радиоаблатированных тканей. В отношении двух других пациентов, у которых сохранялась ФП, четких доказательств клинической эффективности найти не удалось: авторы столкнулись с некоторыми ограничениями, связанными с отказом второго пациента от электрограмм ЛП, регистрируемых пищеводным датчиком. Однако третий пациент прошел это обследование, и после радиоабляции на электрограммах, записанных из пищевода, не было выявлено предсердных по-

тенциалов. Эти данные могут свидетельствовать о достижении электрического блока проведения, что является клинической целью процедуры. Во время наблюдения за пациентом не было зарегистрировано никаких процедуральных, ранних и поздних осложнений [35]. Эти сообщения о серии клинических случаев свидетельствуют о том, что СРАА может быть безопасно проведена в ЛП, способна достичь электрофизиологической конечной точки изоляции задней стенки ЛП и ЛВ [35, 38, 39]. В исследованиях продемонстрировано, что острое тканевое воздействие СРАА на миокард предсердий может наблюдаться уже через 4 дня после лечения. Указанные работы содержат единственный пример эффективного симптоматического лечения пароксизмальной ФП, достигнутого с помощью СРАА, и включают несколько примеров косвенного подтверждения наличия рубца в ЛП после СРАА [35, 38, 39].

Самое крупное на сегодняшний день исследование STAR II (A. Di Monaco и соавт.) [36], не включенное ранее ни в один литературный обзор по терапии СРАА в отношении ФП, продемонстрировало высокую эффективность устранения ФП у пациентов пожилого возраста. В исследование было включено 20 лиц старше 70 лет с пароксизмальной формой ФП. СРАА была выполнена 18 больным. Осложнения, ассоциированные с лучевой нагрузкой, были представлены эзофагитом ( $n = 5$ ; 27,7%), бессимптомным перикардитом не более 2 мм ( $n = 8$ ; 44,5%), симптомным перикардальным выпотом около 5 мм через 6 мес. после терапии ( $n = 1$ ; 5,5%), у одного пациента в течение часа после СРАА развился приступ *torsade de pointes*, успешно купированный электроимпульсной терапией и имплантацией кардиовертера-дефибриллятора [36]. Свобода от ФП после СРАА представлена следующим образом: у 3 (16,6%) пациентов ФП перешла в персистирующую форму, еще у 3 (16,6%) пациентов через 6 и 12 мес. зарегистрированы срывы ритма в атипичное трепетание предсердий. У 7 пациентов аритмия в момент выполнения СРАА и в течение всего периода наблюдения отсутствовала [36].

Эндокардиальное электрофизиологическое исследование выполнено 5 пациентам (трем с атипичной формой трепетания предсердий и двум с пароксизмальной ФП). У всех пациентов была зарегистрирована успешная изоляция ЛВ после процедуры СРАА. Области прорыва возбуждения при атипичном трепетании предсердий регистрировались по передней линии ЛП к митральному клапану и в области крыши ЛП. У одного пациента диагностирована высокая степень фибротических изменений по всей задней стенке ЛП, при этом было принято решение выполнить дополнительно КА всей задней стенки ЛП [36].

Для понимания, может ли неинвазивная абляция играть более широкую роль в лечении ФП, необходимо дальнейший опыт, однако в настоящее время

нет доказательств в пользу рутинного использования СРАА в качестве метода лечения ФП.

### Перспективы СРАА при лечении ФП

Согласно проанализированным данным мировой литературы, СРАА возможно рассмотреть для лечения ФП, резистентной к медикаментозной терапии, у пациентов группы высокого хирургического и катетерного рисков развития осложнений. Стоит отметить, что, несмотря на интерес к этой теме, в настоящее время СРАА при ФП проведена ограниченному числу людей и опубликовано всего три статьи, включающие более одного пациента [35, 36, 39].

В исследовании P.C. Quian и соавт. [39] эффективность достигнута у одного из двух пациентов, однако авторы не предоставили подробной информации об особенностях плана лечения. Кроме того, применены два разных пути пред- и послеоперационного обследования, что нельзя считать сопоставимым. Отсутствие токсичности было единственным общим признаком для всех включенных в исследование больных [39].

В исследовании M. Shoji и соавт. [35] не отмечено ни острых, ни поздних осложнений. Выбор в пользу онкологических пациентов усложняет оценку конечной точки эффективности. Даже если клиническую эффективность на людях трудно определить на ограниченной выборке, в обоих исследованиях в зоне радиоабляции наблюдались фиброз по результатам МРТ-диагностики и наличие электрического блока проведения [35, 39]. Все вышеперечисленные признаки можно трактовать как подтверждение радиоабляционного поражения.

Благодаря единственному на сегодняшний день исследованию по лечению ФП STAR II [36] с включением 20 пациентов пожилого возраста, из которых 18 выполнена процедура СРАА, получены многообещающие и перспективные результаты в краткосрочном периоде наблюдения. В исследовании отражены безопасность, эффективность и улучшение качества жизни пациентов вследствие отсутствия возврата ФП. Согласно последним данным, свобода от предсердных тахикардий после процедуры КА устьев ЛВ варьирует от 70–86% у пациентов старше 75 лет, что сопоставимо с данными, представленными в работе STAR II [15, 36]. В связи с чем необходимы последующие крупные исследования сравнения эффективности и безопасности СРАА с процедурами КА у пациентов пожилого возраста.

Несмотря на преимущества, СРАА является относительно новым подходом к лечению с определенными ограничениями. К ним относятся небольшое количество подходящих пациентов, лечение в одном центре и кратковременные сроки наблюдения. Несомненно, необходим дополнительный клинический опыт и проведение многоцентрового клинического исследования для уточнения лучших практик по безопасности и эффективности СРАА [44]. Также следу-

ет подчеркнуть, что анатомический и структурный субстрат ФП и ЖТ характеризуется специфическими особенностями, которые выражены разными подходами к лечению и необходимости защиты окружающих здоровых структур. По этим причинам некоторые предположения, которые были предварительно подтверждены в области ЖТ, могут быть ошибочны в отношении ФП. Желудочковые аритмии, которые могут заслуживать СРАА, обычно представляют угрозу для жизни. Пациенты имеют рецидивирующую и/или рефрактерную ЖТ, им не показаны традиционные подходы или они для них неэффективны. В таких клинических условиях СРАА представляет собой перспективный вариант, поэтому допускается больше рисков, даже неизвестных.

В современной литературе сообщается о небольшом количестве тяжелых нежелательных явлений, безусловно связанных с СРАА. В частности, один пациент умер от эзофагоперикардального свища через 9 мес. после СРАА, который, скорее всего, не связан с терапией СРАА, а является следствием предыдущей операции шунтирования желудочно-сальниковой артерии [37]; зарегистрировано несколько симптомных перикардитов и перикардальных выпотов, вызванных радиацией, и гастроперикардальный свищ через 2 года после СРАА [43].

**Дозиметрические рекомендации.** Необходимо установить механизмы, лежащие в основе радиационно-ассоциированного эффекта лечения и его долгосрочной продолжительности, поскольку патогенез повреждения при высоких дозах радиотерапии не изучен [25]. Возможным механизмом аблятивной радиотерапии является сочетание повреждения сосудов, приводящего к гипоксии или некрозу тканей, и апоптотической гибели клеток, приводящей к фиброзу и образованию рубцов. Однако эти постулаты относятся к радиоактивному повреждению клеток злокачественной опухоли. Еще меньше известно о механизмах клеточного повреждения незлокачественных аритмогенных тканей сердца [31, 40].

Все больше работ посвящено лечению внутрисердечных злокачественных опухолей методом стереотаксической радиохирургии и возможным побочным эффектам [44–46]. В последние годы также были опубликованы дозиметрические исследования облучения сердца [47, 48]. Существенной проблемой радиохирургии сердца может стать долгосрочное воздействие излучения на миокард, проводящую систему, клапаны и другие ткани сердца. Эти опасения могут быть хотя бы частично сняты изучением долгосрочной токсичности при лимфоме [49] и лечения легких с центральным расположением новообразования [50]. В связи с вышесказанным исключительно длительный период наблюдения позволит получить данные о безопасности и эффективности СРАА при ФП, а также позволит задокументировать долгосрочное токсическое воз-

действие радиотерапии на сердечные структуры, как это изучено в отношении лимфом [32, 49].

Дозы облучения на подструктуры сердца в значительной степени неизвестны, и сообщения о них появились исключительно недавно, без корреляции с токсичностью [23, 27, 40]. В ходе единственного многоцентрового исследования RAVENTA по лечению устойчивых ЖТ были очерчены контуры субструктур сердца, а дозовые ограничения классифицированы на незначительные и значительные [51, 52]. Доза в 25 Гр была принята на основании первого сообщения о клиническом случае, опубликованном P.C. Zei и соавт. [27]. Эта доза признана безопасной и использовалась почти во всех исследованиях, за исключением P.C. Zeng и коллег, которые провели 24 Гр в трех фракциях [27]. В другом исследовании авторы выполнили СРАА более низкими дозами 15 и 20 Гр и сообщили об одном пациенте, которому благополучно выполнили вторую процедуру СРАА [16]. Более высокая дозировка была признана безопасной в доклинических исследованиях. Увеличение дозы свыше 25 Гр приводит к формированию рубца, поэтому лечение может быть более эффективным, как сообщают O. Blanck и соавт. [32]. При дозах облучения до 35–40 Гр не наблюдалось осложнений, связанных с облучением [18, 19]. Будущие исследования могут прояснить проблему дозы и продвинуть эту чрезвычайно перспективную область функциональной радиохирургии значительно вперед.

Поскольку ФП является доброкачественной аритмией, необходимо уделять больше внимания безопасности, а не эффективности СРАА. В этих условиях прежде чем применять СРАА при ФП в клинической практике необходимо получить больше информации о профиле токсичности указанного подхода. Этот факт является одной из причин ограниченного количества исследований в данной области.

**Ограничения.** Доставка одной концентрированной дозы в область сердца может быть сложной

задачей из-за движения сердца и его близкого расположения к критическим структурам. По сравнению с желудочковой тахикардией в предыдущих исследованиях показано, что СРАА считается более сложным методом лечения пациентов с ФП. Причины этого многообразны: создание электрической изоляции ЛПП и ЛВ требует более сложной мишени; не ясно, является ли адекватной однофракционная доза 25 Гр; близкое расположение пищевода и бронхов к мишени может быть ограничивающим фактором.

## Заключение

СРАА является новым направлением в лечении сердечных аритмий, в частности перспективным для пациентов группы высокого риска интраоперационных осложнений (лица пожилого возраста и с тяжелыми сопутствующими заболеваниями, ограничивающими прием как антиаритмических препаратов, так и антикоагулянтов). Многообещающие результаты исследований, полученные в сериях клинических наблюдений, позволят рассмотреть неинвазивный терапевтический подход с использованием СРАА как возможную альтернативу КА для лечения пароксизмальной ФП у пациентов пожилого возраста и онкологических больных. Последующие исследования и данные регистров будут способствовать быстрому расширению знаний об эффективности этого метода, а также выбору оптимальной стратегии отбора пациентов, планирования и проведения СРАА.

## Конфликт интересов

Е.Д. Стребкова заявляет об отсутствии конфликта интересов. Е.А. Артюхина заявляет об отсутствии конфликта интересов. А.Ш. Ревиншвили заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии финансирования статьи.

## Информация об авторах

*Стребкова Елизавета Дмитриевна*, научный сотрудник отделения электрофизиологических рентгенэндоваскулярных методов диагностики и лечения аритмий федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А.В. Вишневского» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-5837-7255

*Артюхина Елена Александровна*, доктор медицинских наук, профессор руководитель отделения электрофизиологических рентгенэндоваскулярных методов диагностики и лечения аритмий федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А.В. Вишневского» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация; профессор кафедры ангиологии, сердечно-сосудистой, эндоваскулярной хирургии и аритмологии имени академика А.В. Покровского федерального государственного бюджетного образовательного

## Author Information Form

*Strebkova Elizaveta D.*, Researcher at the Department of Electrophysiological and Endovascular Image-guided Methods of Diagnosis and Treatment of Arrhythmias, Federal State Budgetary Educational Institution “A.V. Vishnevskiy National Medical Research Center of Surgery” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-5837-7255

*Artyukhina Elena A.*, PhD, Professor, Head of the Department of Electrophysiological and Endovascular Image-guided Methods of Diagnosis and Treatment of Arrhythmias, Federal State Budgetary Educational Institution “A.V. Vishnevskiy National Medical Research Center of Surgery” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; Professor at the Department of Angiology, Cardiovascular, Endovascular Surgery and Arrhythmology named after Academician A.V. Pokrovsky, Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education “Russian Medical Academy of Continuous

учреждения дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-7065-0250

*Ревишвили Амиран Шотаевич*, академик РАН, доктор медицинских наук, профессор директор федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А.В. Вишневского» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация; заведующий кафедрой ангиологии, сердечно-сосудистой, эндovasкулярной хирургии и аритмологии имени академика А.В. Покровского федерального государственного бюджетного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0003-1791-9163

Professional Education” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-7065-0250

*Revishvili Amiran S.*, Academician of the Russian Academy of Sciences, PhD, Professor, Director of the Federal State Budgetary Educational Institution “A.V. Vishnevskiy National Medical Research Center of Surgery” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; Head of the Department of Angiology, Cardiovascular, Endovascular Surgery and Arrhythmology named after Academician A.V. Pokrovsky, Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education “Russian Medical Academy of Continuous Professional Education” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; **ORCID** 0000-0003-1791-9163

#### Вклад авторов в статью

*СЕД* – получение данных исследования, написание и корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*АЕА* – интерпретация данных исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

*РАШ* – интерпретация данных исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

#### Author Contribution Statement

*SED* – data collection, manuscript writing, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

*AEA* – data interpretation, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

*RASH* – data interpretation, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аракелян М.Г., Бокерия Л.А., Васильева Е.Ю., Голицын С.П., Голухова Е.З., Ревишвили А.Ш. и др. Фибрилляция и трепетание предсердий. Клинические рекомендации 2020. Российский кардиологический журнал. 2021;(26):4594. doi: 10.15829/1560-4071-2021-4594.
2. Шапкина М.Ю., Маздорова Е.В., Авдеева Е.М., Щербак Л.В., Рябиков А.Н., Hubacek J., Bobak M., Малютин С.К. Динамика частоты фибрилляции предсердий в российской популяционной выборке за 13 лет наблюдения. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2022;21(8):3108. doi: 10.15829/1728-8800-2022-3108.
3. Стребкова Е.Д., Ревишвили А.Ш., Малышенко Е.С., Артюхина Е.А., Попов В.А., Новиков М.А., Ялова Е.В., Бондурко К.Э., Кармазановский Г.Г., Кадырова М. Отдаленные результаты торакоскопического лечения фибрилляции предсердий. Вестник аритмологии. 2023;30(2):59-69. doi: 10.35336/VA-2023-2-08.
4. Krijthe B.P., Kunst A., Benjamin E.J., Lip G.Y.H., Franco O.H., Hofman A., Wittman J.C.M., Stricker V.H., Heeringa J. Projections on the number of individuals with atrial fibrillation in the European Union, from 2000 to 2060. Eur Heart J. 2013;34(35):2746-2751. doi: 10.1093/eurheartj/ehd280.
5. Сердечная Е.В., Татарский Б.А., Казакевич Е.В. Особенности распространенности и течения фибрилляции предсердий на северо-западе Российской Федерации. Клиническая медицина. 2009;87(1):17-20.
6. Jakobsen C.B., Lambert M., Carlson N., Lock-Hansen M., Torp-Pedersen C., Gislason G.H. Incidence of atrial fibrillation in different major cancer subtypes: a nationwide population-based 12 year follow up study. BMC Cancer. 2019;(19):1105. doi: 10.1186/s12885-019-6314-9.
7. Ревишвили А.Ш., Стребкова Е.Д., Артюхина Е.А., Малышенко Е.С., Новиков М.А., Кадырова М. Эффективность торакоскопического лечения непароксизмальных форм фибрилляции предсердий. Вестник аритмологии. 2023;30(3):23-31. <https://doi.org/10.35336/VA-1160>.
8. Brundel B.J.J.M., Ai X., Hills M.T., Kuipers M.F., Lip G.Y.H., de Groot N.M.S. Atrial fibrillation. Nat Rev Dis Primers. 2022;8(1):21. doi: 10.1038/s41572-022-00347-9.
9. Филатов А.Г., Тарашвили Э.Г. Эпидемиология и социальная значимость фибрилляции предсердий. Анналы аритмологии. 2012;(2):5-13.
10. Haïssaguerre M., Jaïs P., Shah D.C. Spontaneous initiation of atrial fibrillation by ectopic beats originating in the pulmonary veins. N Engl J Med. 1998;339:659-666. doi: 10.1056/NEJM199809033391003.
11. Cuculich P.S., Schill M.R., Kashani R., Mutic S., Lang A., Cooper D. Noninvasive cardiac radiation for ablation of ventricular tachycardia. N Engl J Med. 2017;377:2325-36. doi: 10.1056/NEJMoa1613773
12. Cox J.L. The longstanding, persistent confusion surrounding surgery for atrial fibrillation. J Thorac Cardiovasc Surg. 2010;139:1374-86. doi: 10.1016/j.jtcvs.2010.02.027.
13. Ganesan A.N., Shipp N.J., Brooks A.G. Long-term outcomes of catheter ablation of atrial fibrillation: a systematic review and meta-analysis. J Am Heart Assoc. 2013;2:e004549. doi: 10.1161/JAHA.112.004549.
14. Kennedy R., Oral H. Catheter ablation of atrial fibrillation in the elderly: does the benefit outweigh the risk? Expert Rev Cardiovasc Ther. 2013;11:697-704. doi: 10.1586/erc.13.2.
15. Prasitlumkum N., Tokavanich N., Trongtorsak A., Cheungpasitporn W., Kewcharoen J., Chokesuwattanaskul R. Catheter ablation for atrial fibrillation in the elderly >75 years old: systematic review and meta-analysis. J Cardiovasc Electrophysiol. 2022;33:1435-49. doi: 10.1111/jce.15549.
16. Whitaker J., Mak R.H., Zei P.C. Non-invasive ablation of arrhythmias with stereotactic ablative radiotherapy. Trends Cardiovasc Med. 2022;32(5):287-296. doi: 10.1016/j.tcm.2021.04.008.
17. Refaat M.M., Zakka P., Youssef B., Zeidan Y.H., Geara F., Al-Ahmad A. Noninvasive Cardioablation. Card Electrophysiol Clin. 2019;11(3):481-485. doi: 10.1016/j.ccep.2019.05.008.

18. Васковский В.А., Таймасова И.А., Калинин Д.В., Антипина Н.А., Николаева А.А., Смирнов Г.Ю., Голанов А.В., Потапов А.А., Ревишвили А.А. Применение стереотаксической радиохирургии в эксперименте на крупных животных для проведения неинвазивных вмешательств в аритмологии. *Вестник аритмологии*. 2021;28(1):5-13. doi: 10.35336/VA-2021-1-5-13.
19. Таймасова И.А., Васковский В.А., Артюхина Е.А., Антипина Н.А., Николаева А.А., Смирнов Г.Ю., Сизов В.А., Букарев А.Е., Фадеева О.В., Голанов А.В., Потапов А.А., Ревишвили А.Ш. Возможности и перспективы применения стереотаксической радиохирургии для проведения неинвазивных вмешательств в аритмологии. *Вестник аритмологии*. 2020;27(4):33-41. doi: 10.35336/VA-2020-4-33-41.
20. Loo B.W., Soltys S.G., Wang L., Lo A., Fahimian B.P., Iagaru A. Stereotactic ablative radiotherapy for the treatment of refractory cardiac ventricular arrhythmia. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2015;8:748–50. doi: 10.1161/CIRCEP.115.002765.
21. Robinson C.G., Samson P.P., Moore K.M.S., Hugo G.D., Knutson N., Muttic S., Goddu S.M., Lang A., Cooper D.H., Faddis M., Noheria A., Smith T.W., Woodard P.K., Gropler R.J., Hallahan D.E., Rudy Y., Cuculich P.S. Phase I/II trial of electrophysiology-guided noninvasive cardiac radioablation for ventricular tachycardia. *Circulation*. 2019;139:313–21. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.118.038261.
22. Gianni C., Rivera D., Burkhardt J.D., Pollard B., Gardner E., Maguire P., Zei P.C., Natale A., Al-Ahmad A. Stereotactic arrhythmia radioablation for refractory scar-related ventricular tachycardia. *Heart Rhythm*. 2020;17:1241–8. doi: 10.1016/j.hrthm.2020.02.036
23. Sharma A., Wong D., Weidlich G., Fogarty T., Jack A., Sumanaweera T., Maguire P. Noninvasive stereotactic radiosurgery (CyberHeart) for creation of ablation lesions in the atrium. *Heart Rhythm*. 2010;7:802–10. doi: 10.1016/j.hrthm.2010.02.010
24. Lehmann H.I., Richter D., Prokesch H., Graeff C., Prall M., Simoniello P., Fournier C., Bauer J., Kaderka R., Weymann A., Szabó G., Sonnenberg K., Constantinescu A.M., Johnson S.B., Misiri J., Takami M., Miller R.C., Herman M.G., Asirvatham S.J., Brons S., Jäkel O., Haberer T., Debus J., Durante M., Bert C., Packer D.L. Atrioventricular node ablation in langendorff-perfused porcine hearts using carbon ion particle therapy. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2015;8:429–38. doi: 10.1161/CIRCEP.114.002436.
25. Gardner E.A., Weidlich G.A. Analysis of Dose Distribution in the Heart for Radiosurgical Ablation of Atrial Fibrillation. *Cureus*. 2016;8(7):e703. doi: 10.7759/cureus.703.
26. Bode F., Blanck O., Gebhard M., Hunold P., Grossherr M., Brandt S., Vonthein R., Thiele H., Dunst J., Rades D. Pulmonary vein isolation by radiosurgery: implications for non-invasive treatment of atrial fibrillation. 2015;17(12):1868-74. doi: 10.1093/europace/euu406.
27. Zei P.C., Wong D., Gardner E., Fogarty T., Maguire P. Safety and efficacy of stereotactic radioablation targeting pulmonary vein tissues in an experimental model. *Heart Rhythm*. 2018;15(9):1420-1427. doi: 10.1016/j.hrthm.2018.04.015.
28. Gardner E.A., Sumanaweera T.S., Blanck O., Iwamura A.K., Steel J.P., Dieterich S., Maguire P. In vivo dose measurement using tlds and MOSFET dosimeters for cardiac radiosurgery. *J Appl Clin Med Phys*. 2012;13:190–203. doi: 10.1120/jacmp.v13i3.3745
29. Chang J.H., Cha M.J., Seo J.W., Kim H.J., Park S.Y., Kim B.H., Lee E., Kim M.K., Yoon H.S., Oh S. Feasibility study on stereotactic radiotherapy for total pulmonary vein isolation in a canine model. *Sci Rep*. 2021;11:12369. doi: 10.1038/s41598-021-91660-y
30. Ren X.Y., He P.K., Gao X.S., Zhao Z.L., Zhao B., Bai Y., Liu S.W., Li K., Qin S.B., Ma M.W., Zhou J., Rong Y. Dosimetric feasibility of stereotactic ablative radiotherapy in pulmonary vein isolation for atrial fibrillation using intensity-modulated proton therapy. *J Appl Clin Med Phys*. 2021;22(5):79-88. doi: 10.1002/acm2.13239
31. Xia P., Kotecha R., Sharma N. A treatment planning study of stereotactic body radiotherapy for atrial fibrillation. *Cureus*. 2016;8:e678. doi: 10.7759/cureus.678.
32. Blanck O., Ipsen S., Chan M.K. Treatment planning considerations for robotic guided cardiac radiosurgery for atrial fibrillation. *Cureus*. 2016;8:e705. doi: 10.7759/cureus.705.
33. Ipsen S., Blanck O., Oborn B. Radiotherapy beyond cancer: target localization in real-time MRI and treatment planning for cardiac radiosurgery. *Med Phys*. 2014;41:120702. doi: 10.1118/1.4901414.
34. Sharma A., Wong D., Weidlich G., Fogarty T., Jack A., Sumanaweera T. Noninvasive stereotactic radiosurgery (CyberHeart) for creation of ablation lesions in the atrium. *Heart Rhythm*. 2010;7:802–10. doi: 10.1016/j.hrthm.2010.02.010.
35. Shoji M., Inaba K., Itami J., Hamada M., Okamoto H., Iwasa T., Ushigusa T., Yoshida M., Matsuyama T.A., Otsuka T., Kumagai K., Hirao K., Maguire P., Qian P., Gardner E., Zei P.C. Advantages and challenges for noninvasive atrial fibrillation ablation. *J Interv Card Electrophysiol*. 2021;62:319–27. doi: 10.1007/s10840-020-00904-w/Published.
36. Di Monaco A., Gregucci F., Bonaparte I., Romanazzi I., Troisi F., Surgo A., Vitulano N., Quadri F., Valenti N., Carbonara R., Di Guglielmo F.C., Ludovico E., Calbi R., Guida P., Ciliberti M.P., Fiorentino A., Grimaldi M. Linear accelerator-based stereotactic arrhythmia radioablation for paroxysmal atrial fibrillation in elderly: a prospective phase II trial. *Europace*. 2023;25(12):euad344. doi: 10.1093/europace/euad344.
37. Haskova J., Jedlickova K., Cvek J., Knybel L., Neuwirth R., Kautzner J. Oesophagopericardial fistula as a late complication of stereotactic radiotherapy for recurrent ventricular tachycardia. *Europace*. 2022;euab326. doi: 10.1093/europace/euab326.
38. Monroy E., Azpiri J., De La Peña C., Cardona C., Hinojosa M., Zamarripa R., Assad J. Late gadolinium enhancement cardiac magnetic resonance imaging post robotic radiosurgical pulmonary vein isolation (RRPVI). First case in the world. *Cureus*. 2016;8:e738. doi: 10.7759/cureus.738.
39. Qian P.C., Azpiri J.R., Assad J., Gonzales Aceves E.N., Cardona Ibarra C.E., de la Pena C., Hinojosa M., Wong D., Fogarty T., Maguire P., Jack A., Gardner E.A., Zei P.C. Noninvasive stereotactic radioablation for the treatment of atrial fibrillation: first-in-man experience. *J Arrhythmia*. 2020;36:67–74. doi: 10.1002/joa3.12283.
40. Blanck O., Bode F., Gebhard M., Hunold P., Brandt S., Bruder R., Grossherr M., Vonthein R., Rades D., Dunst J. Dose-escalation study for cardiac radiosurgery in a porcine model. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2014;89:590–8. doi: 10.1016/j.ijrobp.2014.02.036.
41. Maguire P.J., Gardner E., Jack A.B., Zei P., Al-Ahmad A., Fajardo L. Cardiac radiosurgery (CyberHeart™) for treatment of arrhythmia: physiologic and histopathologic correlation in the porcine model. *Cureus*. 2011;3:e32. doi: 10.7759/cureus.32.
42. Chalkia M., Kouloulis V., Tousoulis D., Deftereos S., Tsiachris D., Vrachatis D., Platoni K. Stereotactic Arrhythmia Radioablation as a Novel Treatment Approach for Cardiac Arrhythmias: Facts and Limitations. *Biomedicines*. 2021;9(10):1461. doi: 10.3390/biomedicines9101461.
43. Kovacs B., Mayinger M., Schindler M., Steffel J., Andratschke N., Saguner A.M. Stereotactic radioablation of ventricular arrhythmias in patients with structural heart disease – a systematic review. *Radiother Oncol*. 2021;162:132–9. doi: 10.1016/j.radonc.2021.06.036.
44. Martin A.G.R., Coltart D.J., Plowman P.N. CyberKnife radiosurgery for an intracardiac metastasis. *BMJ Case Rep*. 2011; bcr0720103197. doi: 10.1136/bcr.07.2010.3197.
45. Soltys S.G., Kalani M.Y., Cheshier S.H., Szabo K.A., Lo A., Chang S.D. Stereotactic radiosurgery for a cardiac sarcoma: a case report. *Technol Cancer Res Treat*. 2008;7:363–8. doi: 10.1177/153303460800700502.
46. Bonomo P., Cipressi S., Desideri I., Masi L., Doro R., Iermano C. Stereotactic body radiotherapy with CyberKnife for cardiac malignancies. *Tumori*. 2015;101:294–7. doi: 10.5301/tj.5000280.
47. Adams M.J., Lipshultz S.E., Schwartz C., Fajardo L.F., Coen V., Constine L.S. Radiation-associated cardiovascular disease: manifestations and management. *Semin Radiat Oncol*. 2003;13:346–56. doi: 10.1016/S1053-4296(03)00026-2.
48. Gagliardi G., Constine L.S., Moiseenko V., Correa C., Pierce L.J., Allen A.M. Radiation dose-volume effects in the heart. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2010;76:S77–85. doi: 10.1016/j.ijrobp.2009.04.093.
49. Filippi A.R., Meregalli S., Di Russo A., Levis M., Ciammella P., Buglione M. Fondazione Italiana Linfomi (FIL) expert consensus on the use of intensity-modulated and image-guided radiotherapy for Hodgkin's lymphoma involving the mediastinum. *Radiat Oncol*. 2020;15:62. doi: 10.1186/s13014-020-01504-8.

50. Haasbeek C.J.A., Lagerwaard F.J., Slotman B.J., Senan S. Outcomes of stereotactic ablative radiotherapy for centrally located early-stage lung cancer. *J Thorac Oncol.* 2011;6:2036–43. doi: 10.1097/JTO.0b013e31822e71d8.

51. Kaestner L., Boda-Heggemann J., Fanslau H., Xie J., Schweikard A., Giordano F.A., Blanck O., Rudic B. Electroanatomical mapping after cardiac radioablation for treatment of incessant electrical storm: a case report from the RAVENTA trial. *Strahlenther Onkol.* 2023;199(11):1018-1024. doi: 10.1007/s00066-023-02136-z.

s00066-023-02136-z.

52. Krug D., Zaman A., Eidinger L., Grehn M., Boda-Heggemann J., Rudic B., Mehrhof F., Boldt L.H., Hohmann S., Merten R., Buergy D., Fleckenstein J., Kluge A., Rogge A., Both M., Rades D., Tilz R.R., Olbrich D., König I.R., Siebert F.A., Schweikard A., Vonthein R., Bonnemeier H., Dunst J., Blanck O. Radiosurgery for ventricular tachycardia (RAVENTA): interim analysis of a multicenter multiplatform feasibility trial. *Strahlenther Onkol.* 2023;199(7):621-630. doi: 10.1007/s00066-023-02091-9.

## REFERENCES

1. Arakelyan M.G., Bockeria L.A., Vasilieva E.Yu., Golitsyn S.P., Golukhova E.Z., Revishvili A.Sh. 2020 Clinical guidelines for Atrial fibrillation and atrial flutter. *Russian Journal of Cardiology.* 2021;26(7):4594. doi: 10.15829/1560-4071-2021-4594. (In Russian)

2. Shapkina M.Yu., Mazdorova E.V., Avdeeva E.M., Shcherbakova L.V., Ryabikov A.N., Hubachek J.A., Bobak M., Malyutina S.K. Changes in the prevalence of atrial fibrillation in the Russian population over a 13-year follow-up. *Cardiovascular Therapy and Prevention.* 2022;21(8):3108. doi: 10.15829/1728-8800-2022-3108. (In Russian)

3. Strebkova E.D., Revishvili A.Sh., Malishenko E.S., Artyukhina E.A., Popov V.A., Novikov M.A., Yalova E.V., Bondurko K.E., Karmazanovsky G.G., Kadirova M. Long-term outcomes of thoracoscopic ablation for atrial fibrillation. *Journal of Arrhythmology.* 2023;30(2):59-69. doi: 10.35336/VA-2023-2-08. (In Russian)

4. Krijthe B.P., Kunst A., Benjamin E.J., Lip G.Y.H., Franco O.H., Hofman A., Wittteman J.C.M., Stricker B.H., Heeringa J. Projections on the number of individuals with atrial fibrillation in the European Union, from 2000 to 2060. *Eur Heart J.* 2013;34(35):2746-2751. doi: 10.1093/eurheartj/ehs280.

5. Serdechnaya E.V., Tatarsky B.A., Kazakevich E.V. Peculiarities of prevalence and course of atrial fibrillation in the north-west of the Russian Federation. *Clin Medicine.* 2009;87(1):17-20. (In Russian)

6. Jakobsen C.B., Lamberts M., Carlson N., Lock-Hansen M., Torp-Pedersen C., Gislason G.H. Incidence of atrial fibrillation in different major cancer subtypes: a nationwide population-based 12 year follow up study. *BMC Cancer.* 2019;(19):1105. doi: 10.1186/s12885-019-6314-9.

7. Revishvili A.Sh., Strebkova E.D., Artyukhina E.A., Malishenko E.S., Novikov M.A., Kadirova M. The effectiveness of thoracoscopic treatment of non-paroxysmal atrial fibrillation. *Journal of Arrhythmology.* 2023;30(3):23-31. doi: 10.35336/VA-1160. (In Russian)

8. Brundel B.J.J.M., Ai X., Hills M.T., Kuipers M.F., Lip G.Y.H., de Groot N.M.S. Atrial fibrillation. *Nat Rev Dis Primers.* 2022;8(1):21. doi: 10.1038/s41572-022-00347-9.

9. Filatov A.G., Tarashvili E.G. Epidemiology and social significance of atrial fibrillation. *Annals of arrhythmology.* 2012;(2):5-13. (In Russian)

10. Haïssaguerre M., Jaïs P., Shah D.C. Spontaneous initiation of atrial fibrillation by ectopic beats originating in the pulmonary veins. *N Engl J Med.* 1998;339:659-666. doi: 10.1056/NEJM199809033391003.

11. Cuculich P.S., Schill M.R., Kashani R., Mutic S., Lang A., Cooper D. Noninvasive cardiac radiation for ablation of ventricular tachycardia. *N Engl J Med.* 2017;377:2325–36. doi: 10.1056/NEJMoa1613773

12. Cox J.L. The longstanding, persistent confusion surrounding surgery for atrial fibrillation. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2010;139:1374–86. doi: 10.1016/j.jtcvs.2010.02.027.

13. Ganesan A.N., Shipp N.J., Brooks A.G. Long-term outcomes of catheter ablation of atrial fibrillation: a systematic review and meta-analysis. *J Am Heart Assoc.* 2013;2:e004549. doi: 10.1161/JAHA.112.004549.

14. Kennedy R., Oral H. Catheter ablation of atrial fibrillation in the elderly: does the benefit outweigh the risk? *Expert Rev Cardiovasc Ther* 2013;11:697–704. doi: 10.1586/erc.13.2.

15. Prasitlunkum N., Tokavanich N., Trongtorsak A., Cheungpasitporn W., Kewcharoen J., Chokesuwattanaskul R. Catheter ablation for atrial fibrillation in the elderly >75 years old: systematic review and meta-analysis. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2022;33:1435–49. doi: 10.1111/jce.15549.

16. Whitaker J., Mak R.H., Zei P.C. Non-invasive ablation of arrhythmias with stereotactic ablative radiotherapy. *Trends Cardiovasc Med.* 2022;32(5):287-296. doi: 10.1016/j.tcm.2021.04.008.

17. Refaat M.M., Zakka P., Youssef B., Zeidan Y.H., Geara F., Al-Ahmad A. Noninvasive Cardioablation. *Card Electrophysiol Clin.* 2019;11(3):481-485. doi: 10.1016/j.ccep.2019.05.008.

18. Vaskovskiy V.A., Taymasova I.A., Kalinin D.V., Antipina N.A., Nikolaeva A.A., Smirnov G.Y., Golanov A.V., Potapov A.A., Revishvili A.Sh. Experimental use of stereotactic radiosurgery for non-invasive interventions in arrhythmology. *Journal of Arrhythmology.* 2021;28(1):5-13. doi: 10.35336/VA-2021-1-5-13. (In Russian)

19. Taymasova I.A., Vaskovskiy V.A., Artukhina E.A., Antipina N.A., Nikolaeva A.A., Smirnov G.Yu., Sizov V.A., Bukharev A.E., Fadeeva O.V., Golanov A.V., Potapov A.A., Revishvili A.Sh. Opportunities and perspectives of stereotactic radiosurgery for non-invasive arrhythmology interventions. *Journal of Arrhythmology.* 2020;27(4):33-41. doi: 10.35336/VA-2020-4-33-41. (In Russian)

20. Loo B.W., Soltys S.G., Wang L., Lo A., Fahimian B.P., Iagaru A. Stereotactic ablative radiotherapy for the treatment of refractory cardiac ventricular arrhythmia. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2015;8:748–50. doi: 10.1161/CIRCEP.115.002765.

21. Robinson C.G., Samson P.P., Moore K.M.S., Hugo G.D., Knutson N., Mutic S., Goddu S.M., Lang A., Cooper D.H., Faddis M., Noheria A., Smith T.W., Woodard P.K., Gropler R.J., Hallahan D.E., Rudy Y., Cuculich P.S. Phase I/II trial of electrophysiology-guided noninvasive cardiac radioablation for ventricular tachycardia. *Circulation.* 2019;139:313–21. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.118.038261.

22. Gianni C., Rivera D., Burkhardt J.D., Pollard B., Gardner E., Maguire P., Zei P.C., Natale A., Al-Ahmad A. Stereotactic arrhythmia radioablation for refractory scar-related ventricular tachycardia. *Heart Rhythm.* 2020;17:1241–8. doi: 10.1016/j.hrthm.2020.02.036

23. Sharma A., Wong D., Weidlich G., Fogarty T., Jack A., Sumanaweera T., Maguire P. Noninvasive stereotactic radiosurgery (CyberHeart) for creation of ablation lesions in the atrium. *Heart Rhythm.* 2010;7:802–10. doi: 10.1016/j.hrthm.2010.02.010

24. Lehmann H.I., Richter D., Prokesch H., Graeff C., Prall M., Simoniello P., Fournier C., Bauer J., Kaderka R., Weymann A., Szabó G., Sonnenberg K., Constantinescu A.M., Johnson S.B., Misiri J., Takami M., Miller R.C., Herman M.G., Asirvatham S.J., Brons S., Jäkel O., Haberer T., Debus J., Durante M., Bert C., Packer D.L. Atrioventricular node ablation in langendorff-perfused porcine hearts using carbon ion particle therapy. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2015;8:429–38. doi: 10.1161/CIRCEP.114.002436.

25. Gardner E.A., Weidlich G.A. Analysis of Dose Distribution in the Heart for Radiosurgical Ablation of Atrial Fibrillation. *Cureus.* 2016;8(7):e703. doi: 10.7759/cureus.703.

26. Bode F., Blanck O., Gebhard M., Hunold P., Grossherr M., Brandt S., Vonthein R., Thiele H., Dunst J., Rades D. Pulmonary vein isolation by radiosurgery: implications for non-

invasive treatment of atrial fibrillation. 2015;17(12):1868-74. doi: 10.1093/europace/euu406.

27. Zei P.C., Wong D., Gardner E., Fogarty T., Maguire P. Safety and efficacy of stereotactic radioablation targeting pulmonary vein tissues in an experimental model. *Heart Rhythm*. 2018;15(9):1420-1427. doi: 10.1016/j.hrthm.2018.04.015.

28. Gardner E.A., Sumanaweera T.S., Blanck O., Iwamura A.K., Steel J.P., Dieterich S., Maguire P. In vivo dose measurement using tlds and MOSFET dosimeters for cardiac radiosurgery. *J Appl Clin Med Phys*. 2012;13:190-203. doi: 10.1120/jacmp.v13i3.3745

29. Chang J.H., Cha M.J., Seo J.W., Kim H.J., Park S.Y., Kim B.H., Lee E., Kim M.K., Yoon H.S., Oh S. Feasibility study on stereotactic radiotherapy for total pulmonary vein isolation in a canine model. *Sci Rep*. 2021;11:12369. doi: 10.1038/s41598-021-91660-y

30. Ren X.Y., He P.K., Gao X.S., Zhao Z.L., Zhao B., Bai Y., Liu S.W., Li K., Qin S.B., Ma M.W., Zhou J., Rong Y. Dosimetric feasibility of stereotactic ablative radiotherapy in pulmonary vein isolation for atrial fibrillation using intensity-modulated proton therapy. *J Appl Clin Med Phys*. 2021;22(5):79-88. doi: 10.1002/acm2.13239

31. Xia P., Kotecha R., Sharma N. A treatment planning study of stereotactic body radiotherapy for atrial fibrillation. *Cureus*. 2016;8:e678. doi: 10.7759/cureus.678.

32. Blanck O., Ipsen S., Chan M.K. Treatment planning considerations for robotic guided cardiac radiosurgery for atrial fibrillation. *Cureus*. 2016;8:e705. doi: 10.7759/cureus.705.

33. Ipsen S., Blanck O., Oborn B. Radiotherapy beyond cancer: target localization in real-time MRI and treatment planning for cardiac radiosurgery. *Med Phys*. 2014;41:120702. doi: 10.1118/1.4901414.

34. Sharma A., Wong D., Weidlich G., Fogarty T., Jack A., Sumanaweera T. Noninvasive stereotactic radiosurgery (CyberHeart) for creation of ablation lesions in the atrium. *Heart Rhythm*. 2010;7:802-10. doi: 10.1016/j.hrthm.2010.02.010.

35. Shoji M., Inaba K., Itami J., Hamada M., Okamoto H., Iwasa T., Ushigusa T., Yoshida M., Matsuyama T.A., Otsuka T., Kumagai K., Hirao K., Maguire P., Qian P., Gardner E., Zei P.C. Advantages and challenges for noninvasive atrial fibrillation ablation. *J Interv Card Electrophysiol*. 2021;62:319-27. doi: 10.1007/s10840-020-00904-w/Published.

36. Di Monaco A., Gregucci F., Bonaparte I., Romanazzi I., Troisi F., Surgo A., Vitulano N., Quadri F., Valenti N., Carbonara R., Di Guglielmo F.C., Ludovico E., Calbi R., Guida P., Ciliberti M.P., Fiorentino A., Grimaldi M. Linear accelerator-based stereotactic arrhythmia radioablation for paroxysmal atrial fibrillation in elderly: a prospective phase II trial. *Europace*. 2023;25(12):euad344. doi: 10.1093/europace/euad344.

37. Haskova J., Jedlickova K., Cvek J., Knybel L., Neuwirth R., Kautzner J. Oesophagopericardial fistula as a late complication of stereotactic radiotherapy for recurrent ventricular tachycardia. *Europace*. 2022:euab326. doi: 10.1093/europace/euab326.

38. Monroy E., Azpiri J., De La Peña C., Cardona C., Hinojosa M., Zamarripa R., Assad J. Late gadolinium enhancement cardiac magnetic resonance imaging post robotic radiosurgical pulmonary vein isolation (RRPVI). First case in the world. *Cureus*. 2016;8:e738. doi: 10.7759/cureus.738.

39. Qian P.C., Azpiri J.R., Assad J., Gonzales Aceves E.N., Cardona Ibarra C.E., de la Pena C., Hinojosa M., Wong D., Fogarty T., Maguire P., Jack A., Gardner E.A., Zei P.C. Noninvasive stereotactic radioablation for the treatment of atrial fibrillation: first-in-man experience. *J Arrhythmia*. 2020;36:67-74. doi: 10.1002/joa3.12283.

40. Blanck O., Bode F., Gebhard M., Hunold P., Brandt S., Bruder R., Grossherr M., Vonthein R., Rades D., Dunst J. Dose-escalation study for cardiac radiosurgery in a porcine model. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2014;89:590-8. doi: 10.1016/j.ijrobp.2014.02.036.

41. Maguire P.J., Gardner E., Jack A.B., Zei P., Al-Ahmad A., Fajardo L. Cardiac radiosurgery (CyberHeart™) for treatment of arrhythmia: physiologic and histopathologic correlation in the porcine model. *Cureus*. 2011;3:e32. doi: 10.7759/cureus.32.

42. Chalkia M., Kouloulis V., Tousoulis D., Deftereos S., Tsiachris D., Vrachatis D., Platonis K. Stereotactic Arrhythmia Radioablation as a Novel Treatment Approach for Cardiac Arrhythmias: Facts and Limitations. *Biomedicines*. 2021;9(10):1461. doi: 10.3390/biomedicines9101461.

43. Kovacs B., Mayinger M., Schindler M., Steffel J., Andratschke N., Saguner A.M. Stereotactic radioablation of ventricular arrhythmias in patients with structural heart disease – a systematic review. *Radiother Oncol*. 2021;162:132-9. doi: 10.1016/j.radonc.2021.06.036.

44. Martin A.G.R., Coltart D.J., Plowman P.N. CyberKnife radiosurgery for an intracardiac metastasis. *BMJ Case Rep*. 2011:bcr0720103197. doi: 10.1136/bcr.07.2010.3197.

45. Soltys S.G., Kalani M.Y., Cheshier S.H., Szabo K.A., Lo A., Chang S.D. Stereotactic radiosurgery for a cardiac sarcoma: a case report. *Technol Cancer Res Treat*. 2008;7:363-8. doi: 10.1177/153303460800700502.

46. Bonomo P., Cipressi S., Desideri I., Masi L., Doro R., Iermano C. Stereotactic body radiotherapy with CyberKnife for cardiac malignancies. *Tumori*. 2015;101:294-7. doi: 10.5301/tj.5000280.

47. Adams M.J., Lipshultz S.E., Schwartz C., Fajardo L.F., Coen V., Constine L.S. Radiation-associated cardiovascular disease: manifestations and management. *Semin Radiat Oncol*. 2003;13:346-56. doi: 10.1016/S1053-4296(03)00026-2.

48. Gagliardi G., Constine L.S., Moiseenko V., Correa C., Pierce L.J., Allen A.M. Radiation dose-volume effects in the heart. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2010;76:S77-85. doi: 10.1016/j.ijrobp.2009.04.093.

49. Filippi A.R., Meregalli S., Di Russo A., Levis M., Ciammella P., Buglione M. Fondazione Italiana Linfomi (FIL) expert consensus on the use of intensity-modulated and image-guided radiotherapy for Hodgkin's lymphoma involving the mediastinum. *Radiat Oncol*. 2020;15:62. doi: 10.1186/s13014-020-01504-8.

50. Haasbeek C.J.A., Lagerwaard F.J., Slotman B.J., Senan S. Outcomes of stereotactic ablative radiotherapy for centrally located early-stage lung cancer. *J Thorac Oncol*. 2011;6:2036-43. doi: 10.1097/JTO.0b013e31822e71d8.

51. Kaestner L., Boda-Heggemann J., Fanslau H., Xie J., Schweikard A., Giordano F.A., Blanck O., Rudic B. Electroanatomical mapping after cardiac radioablation for treatment of incessant electrical storm: a case report from the RAVENTA trial. *Strahlenther Onkol*. 2023;199(11):1018-1024. doi: 10.1007/s00066-023-02136-z.

52. Krug D., Zaman A., Eidinger L., Grehn M., Boda-Heggemann J., Rudic B., Mehrhof F., Boldt L.H., Hohmann S., Merten R., Buergy D., Fleckenstein J., Kluge A., Rogge A., Both M., Rades D., Tilz R.R., Olbrich D., König I.R., Siebert F.A., Schweikard A., Vonthein R., Bonnemeier H., Dunst J., Blanck O. Radiosurgery for ventricular tachycardia (RAVENTA): interim analysis of a multicenter multiplatform feasibility trial. *Strahlenther Onkol*. 2023;199(7):621-630. doi: 10.1007/s00066-023-02091-9.

**Для цитирования:** Стребкова Е.Д., Артюхина Е.А., Ревивили А.Ш. Стереотаксическая радиоабляция как неинвазивный метод лечения фибрилляции предсердий. Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2024;13(2): 116-127. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-2-116-127

**To cite:** Strebkova E.D., Artyukhina E.A., Revishvili A.Sh. Stereotactic radioablation as a non-invasive approach in the treatment of persistent atrial fibrillation. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2024;13(2): 116-127. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-2-116-127