

Ятрогенный пробой изоляции: как автоматический алгоритм тестирования порога запускает цикл рецидивирующей утечки тока (клинический случай)

Аннотация

Описан случай пациентки с имплантированным двухкамерным кардиостимулятором Sorin Reply DR и электродом SonRtip PS55D. Данная модель электрода имеет подтверждённый научными исследованиями производственный дефект изоляции. Несмотря на то что стандартные протоколы программирования не выявили отклонений, у пациентки развились специфические симптомы, указывающие на перемежающуюся утечку тока с электродов: гальванический эффект, локальные ощущения жжения, холода и тяжести, мышечные подёргивания, акустические феномены, эпизод гипертермии и необъяснимая потеря веса. Анализ выявил циклический процесс «пробой-рубцевание-рецидив», запускаемый алгоритмом автоматического тестирования порога стимуляции (AutoCapture). Данный случай демонстрирует ятрогенный механизм повреждения электрода, ограниченность стандартных протоколов и необходимость индивидуального подхода к пациентам с атипичными жалобами после имплантации устройств.

Ключевые слова: дефект изоляции электрода, кардиостимулятор, AutoCapture, ятрогенное повреждение, утечка тока, Sorin SonRtip, пробой диэлектрика.

1. Введение

Современные кардиостимуляторы являются высокотехнологичными устройствами, работающими по стандартным протоколам настройки и мониторинга. Эти протоколы опираются на усреднённые параметры и предполагают, что оборудование, включая электроды, исправно. Однако при возникновении редких, но потенциально опасных отклонений, таких как частичное нарушение изоляции электродов, стандартные алгоритмы могут не только не помочь, но и усугубить проблему, создавая ятрогенный механизм повреждения [1, 2].

Перемежающаяся утечка тока с электрода — это состояние, при котором дефект изоляции временно закрывается фибрином, а затем вновь открывается под воздействием высокоамплитудных импульсов. Такой циклический процесс трудно диагностировать при рутинных проверках, однако он может вызывать серьёзные клинические последствия [3].

1.1. Обзор проблемы

Нарушения изоляции электродов для постоянной кардиостимуляции являются серьёзным, хотя и относительно редким осложнением. По данным регистров, частота дефектов варьирует от 1% до 5% для большинства моделей электродов [4–7]. Однако для электрода Sorin SonRtip PS55D, имплантированного пациентке, в работе Thomas O. et al. (2019) зафиксирована аномально высокая кумулятивная частота отказов по изоляции — до 17% в течение трёх лет [8]. Причиной признан производственный дефект полиуретановой оболочки, локализованный дистальнее места входа в вену, что исключает классический механизм crush injury и указывает на внутренний брак экструзии [8, 9].

Механизм отказа включает проникновение биологической жидкости в микротрещины

изоляции с последующим развитием электрического «водного дерева» (water treeing) — процесса, хорошо описанного в физике диэлектриков [10, 11]. Фибриновая герметизация дефекта *in vivo* создаёт феномен перемежающейся утечки, который ускользает от рутинной внутрисхемной диагностики, проводимой при низком токе [3, 12].

Данная статья описывает случай пациентки с электродом SonRtip PS55D, у которой утечка тока наблюдалась с обоих электродов — и предсердного, и желудочкового, — но импеданс желудочкового электрода снижался быстрее, что указывает на его более выраженную деградацию. Стандартные протоколы программирования не выявили проблему, несмотря на наличие выраженных и специфических симптомов.

2. Описание случая

Исходные данные.

Пациентка, 66 лет, физик. Диагноз: полная АВ-блокада, идиовентрикулярный замещающий ритм 30–32 удара в минуту. В ноябре 2024 года выполнена имплантация двухкамерного электрокардиостимулятора Sorin Reply DR с электродом SonRtip PS55D.

Хронология программирований.

13 февраля 2025 года, Краевая клиническая больница. Первое программирование после имплантации. Чувствительность желудочкового канала установлена на уровне 7.5 мВ. Импеданс обоих электродов в пределах нормы.

27 ноября 2025 года, Федеральный кардиоцентр. Плановое программирование. Зафиксировано падение импеданса обоих электродов: предсердный канал — 532 Ом, желудочковый — 596 Ом. Чувствительность желудочкового канала заглублена до 15 мВ.

21 июля 2026 года, Федеральный кардиоцентр. Повторное программирование. Импеданс: предсердный — 531 Ом, желудочковый — 529 Ом. Чувствительность желудочкового канала оставлена на уровне 15 мВ.

Важно отметить, что, хотя абсолютные значения импеданса формально оставались в пределах допустимого заводского диапазона, их выраженная отрицательная динамика за период с ноября 2025 по июль 2026 года (особенно падение желудочкового с 596 до 529 Ом) является патогномоничным признаком прогрессирующего нарушения целостности изоляции. Более быстрое падение импеданса желудочкового канала на 67 Ом, по сравнению с предсердным (стабильно на нижней границе), указывает на более высокую скорость деградации его изоляционного слоя. Заглубление чувствительности до 15 мВ указывает на попытку подавления шумов, вызванных утечкой тока с электродов, однако одновременно лишает прибор возможности детектировать собственный ритм пациентки.

3. Симптомы, оставшиеся за рамками стандартных протоколов

В силу ограниченности времени амбулаторного приёма ряд критически важных симптомов не был зафиксирован в медицинской документации в полном объёме. Ниже приводится их систематизированное описание.

Гальванический эффект. Пациентка неоднократно ощущала прохождение электрического тока в теле, особенно выраженное при контакте с водой. В период максимальной активности симптомов (апрель-май 2026 года) при мытье ног в тазике возникло ощущение тока, проходящего между ногами. Это классический признак утечки тока с электрода в окружающие ткани, когда тело становится частью электрической цепи.

Локальные ощущения в области грудной клетки и живота. После эпизодов высокоамплитудной стимуляции в правой половине грудной клетки возникают разнообразные ощущения, характер и локализация которых варьируют. Наиболее часто отмечается жжение, локализованное немного правее грудинно-ключичного сочленения. Однако эта зона не является фиксированной: в период острой гальваники (апрель-май 2026 года) ощущения мигрировали. Зона дискомфорта перемещалась из области грудной клетки в область живота, при этом её размер оставался ограниченным — от нескольких сантиметров до примерно 10 см в диаметре. Одновременного захвата и грудной клетки, и живота не происходило: ощущения локализовались в одной области, меняя своё положение. Ощущения также могут возникать в области правой или левой ключицы и шеи, что указывает на распространение тока утечки вдоль сосудисто-нервных пучков.

Помимо жжения, пациентка описывает ощущение холода и чувство тяжести в той же области. Размер зоны ощущений непостоянен: он варьирует от небольшого локализованного участка до области диаметром около 10 см. Характерно, что размер, интенсивность и локализация ощущений изменяются в зависимости от положения тела, что прямо указывает на изменение пути тока утечки при смещении электрода и окружающих тканей.

Временное облегчение жжения приносило прикладывание мокрой салфетки к зоне дискомфорта, что можно объяснить созданием альтернативного, более низкоомного пути для тока утечки на поверхность кожи.

Акустический феномен. При последнем, самом мощном эпизоде в июле 2026 года серии высокоамплитудных толчков сопровождался отчётливый акустический феномен, субъективно воспринятый пациенткой как механический щелчок. Учитывая отсутствие в конструкции имплантируемого устройства каких-либо механических реле, наиболее вероятным источником звука является эффект кавитации в биотканях в момент высоковольтного электрического пробоя изоляции электрода, либо резкое пьезоэлектрическое смещение тканей, прилегающих к месту дефекта. Этот звуковой феномен хронологически совпал с началом мощных мышечных сокращений, что подтверждает связь акустического события с эпизодом массивной утечки тока.

Гипертермия. В июне 2026 года пациентка перенесла трёхдневный эпизод лихорадки до 39.6°C без каких-либо признаков инфекции.

Потеря веса. За несколько месяцев вес пациентки снизился с 79 до 68 кг без изменения диеты или уровня физической активности.

Мышечные подёргивания. Периодически возникали подёргивания мышц в области под правой челюстью. Эти подёргивания могут совпадать по времени с появлением ощущений в области шеи и ключиц, что подтверждает связь обоих симптомов с прохождением тока утечки.

4. Цикл «пробой-рубцевание-рецидив»

На основе анализа временной последовательности событий автором выявлен циклический процесс, не описанный ранее в литературе.

Физический механизм цикла. Дефект изоляции электрода, заполненный биологической жидкостью, представляет собой среду с локально сниженной диэлектрической прочностью. Высокоамплитудный импульс AutoCapture (вплоть до физического предела устройства — 7.5 В) создает напряженность поля, достаточную для лавинообразного роста тока утечки через этот дефект (пробой). Это вызывает локальный электролиз и коагуляционный некроз прилегающих тканей, что клинически проявляется симптомами. В последующем воспалительная реакция и отложение фибрина временно замещают зону некроза фибриновой «пломбой», имеющей более высокое сопротивление (рубцевание). Однако эта фибриновая ткань электрически и механически нестабильна, и следующий высоковольтный импульс вновь пробивает её, замыкая порочный круг [10, 11].

Этапы цикла:

1. Пробой. Автоматический алгоритм тестирования порога стимуляции (AutoCapture) подаёт на электрод высокоамплитудный импульс. Этот импульс, попадая в микротрещину изоляции электрода, пробивает её, вызывая утечку тока в окружающие ткани.
2. Симптоматическая фаза. После пробоя пациентка ощущает жжение, гальванический эффект, мышечные подёргивания. Симптомы сохраняются от нескольких часов до нескольких дней.
3. Рубцевание. В течение двух-четырёх недель дефект изоляции электрода временно закрывается фибриновой «заплаткой». Симптомы постепенно затухают и полностью исчезают. Импеданс электрода возвращается к пограничным значениям.
4. Рецидив. Очередной тест AutoCapture снова подаёт высокоамплитудный импульс на электрод, который пробивает фибриновую заплатку, и цикл повторяется.

Таким образом, штатный алгоритм, призванный обеспечивать безопасность, сам провоцирует рецидив утечки тока с электрода и расширение дефекта изоляции. Это ятрогенный порочный круг, который не может быть разорван без внешнего вмешательства.

5. Обсуждение

Данный случай демонстрирует несколько важных проблем современной практики.

Ограниченность стандартных протоколов. Стандартное программирование оценивает состояние системы на момент осмотра. Перемежающаяся утечка тока с электродов, которая временно закрывается фибрином, может не быть обнаружена. Более того, загрубление чувствительности, предпринятое для подавления шумов от утечки, маскирует проблему, лишая прибор возможности детектировать собственный ритм пациента [12].

Ятрогенная опасность автоматических алгоритмов. Алгоритм AutoCapture разработан для поиска порога стимуляции в условиях нормального импеданса электродов [13]. В

условиях утечки тока с электродов он действует разрушительно, подавая импульсы максимальной амплитуды на ослабленную изоляцию. Это противоречит базовому принципу «не навреди», поскольку штатная функция устройства становится источником ятрогенного повреждения [14].

Опасность неконтролируемого нагрузочного тестирования. Описанный случай наглядно демонстрирует парадоксальную ситуацию: алгоритм AutoCapture, выполняя серию высокоамплитудных импульсов для поиска порога стимуляции, фактически осуществляет непреднамеренное нагрузочное тестирование электрода с дефектом изоляции. Однако, в отличие от контролируемого нагрузочного теста в условиях стационара, данная процедура происходит без информированного согласия пациента, без мониторинга его состояния и без готовности к экстренной замене электрода. Пациент, сам того не зная, подвергается многократным электрическим пробоям изоляции, что расширяет дефект и усугубляет клиническую симптоматику.

Неполнота клинической картины. Специфические жалобы пациентки не были зафиксированы в полном объеме, что затруднило диагностику. Это указывает на необходимость более тщательного сбора анамнеза у пациентов с имплантированными устройствами, особенно при наличии нетипичных симптомов.

Проблема «слепой зоны». Между эпизодами пробоя импеданс электродов может возвращаться к пограничным значениям, создавая ложное впечатление благополучия. Это «слепая зона» стандартного мониторинга, для выхода из которой необходимы расширенные диагностические протоколы. Дистанционный мониторинг с анализом трендов импеданса, а не только абсолютных значений, может помочь в выявлении подобных случаев [15]. В качестве дополнительного диагностического инструмента может рассматриваться анализ внутрисердечных электрограмм в момент подачи стимула для выявления артефактов утечки [12, 16].

6. Заключение

Описанный случай показывает, что стандартные протоколы программирования кардиостимуляторов не всегда способны выявить перемежающуюся утечку тока с электродов. Автоматические алгоритмы, такие как AutoCapture, в условиях дефекта изоляции электродов могут не обеспечивать безопасность, а, напротив, провоцировать ятрогенные рецидивы.

Пациенты с атипичными жалобами после имплантации ЭКС заслуживают более тщательного и индивидуального подхода, включая расширенную диагностику. В случаях подозрения на перемежающуюся утечку тока единственной безопасной стратегией до замены электрода является полное отключение автоматических алгоритмов тестирования порога (AutoCapture) с переводом устройства в режим фиксированной, минимально достаточной амплитуды стимуляции. Это позволит разорвать описанный порочный круг «пробой-рубцевание-рецидив» и предотвратить дальнейшее повреждение как самого электрода, так и окружающих тканей пациента.

Литература

1. Swerdlow C.D., Kalahasty G., Ellenbogen K.A. Lead failure: mechanisms, diagnosis, and

- management // Heart Rhythm. 2014. Vol. 11. No. 12. Pp. 2268–2276.
doi:10.1016/j.hrthm.2014.08.023.
2. Hauser R.G., Hayes D.L., Kallinen L.M. et al. Clinical experience with pacemaker lead insulation defects // Heart Rhythm. 2012. Vol. 9. No. 3. Pp. 332–337.
doi:10.1016/j.hrthm.2011.10.028.
3. Swerdlow C.D., Asirvatham S.J., Ellenbogen K.A. Troubleshooting implanted cardioverter defibrillator sensing problems II // Circ Arrhythm Electrophysiol. 2015. Vol. 8. No. 1. Pp. 212–220. doi:10.1161/CIRCEP.114.002514.
4. Ellenbogen K.A., Wood M.A., Shepard R.K. Delayed complications following pacemaker implantation // Pacing Clin Electrophysiol. 2005. Vol. 28. Suppl 1. Pp. S253–S256.
doi:10.1111/j.1540-8159.2005.00079.x.
5. Kleemann T., Becker T., Doenges K. et al. Annual rate of transvenous defibrillation lead defects in implantable cardioverter-defibrillators over a period of >10 years // Circulation. 2007. Vol. 115. No. 19. Pp. 2474–2480. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.106.663807.
6. Wilkoff B.L., Love C.J., Byrd C.L. et al. Transvenous lead extraction: Heart Rhythm Society expert consensus on facilities, training, indications, and patient management // Heart Rhythm. 2009. Vol. 6. No. 7. Pp. 1085–1104. doi:10.1016/j.hrthm.2009.05.020.
7. Wiggins J.N., Wilkoff B.L. Lead failure: causes, prevention, and management // Card Electrophysiol Clin. 2018. Vol. 10. No. 4. Pp. 653–665. doi:10.1016/j.ccep.2018.08.003.
8. Thomas O., Cebron J.P., Sagnol P. et al. Insulation defects in Sorin SonRtip leads: a single-center experience // PLOS ONE. 2019. Vol. 14. No. 5. P. e0216641.
doi:10.1371/journal.pone.0216641.
9. Schaller R., Meyre P., Sticherling C. et al. High incidence of insulation defects with the Sorin SonRtip lead: a word of caution // Europace. 2020. Vol. 22. No. 5. Pp. 780–786.
doi:10.1093/europace/euaa032.
10. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. London: Peter Peregrinus Ltd, 1992. Pp. 217–255.
11. Steennis E.F., Kreuger F.H. Water treeing in polyethylene cables // IEEE Trans Electr Insul. 1990. Vol. 25. No. 5. Pp. 989–1028. doi:10.1109/14.57006.
12. Swerdlow C.D., Asirvatham S.J., Ellenbogen K.A. Troubleshooting implanted cardioverter defibrillator sensing problems I // Circ Arrhythm Electrophysiol. 2014. Vol. 7. No. 6. Pp. 1237–1245. doi:10.1161/CIRCEP.114.002513.
13. Sperzel J., Neuzner J., Schwarz T. et al. Automatic capture verification in ICD leads: clinical experience with the Kappa 900 system // Pacing Clin Electrophysiol. 2005. Vol. 28. No. 1. Pp. 51–58. doi:10.1111/j.1540-8159.2005.09379.x.
14. Gold M.R., Singh J.P., Ellenbogen K.A. Troubleshooting of automatic capture management algorithms // Heart Rhythm. 2010. Vol. 7. No. 8. Pp. 1175–1180.
doi:10.1016/j.hrthm.2010.03.047.
15. Varma N., Epstein A.E., Irnpen A. et al. Efficacy and safety of automatic remote monitoring for ICD follow-up: the TRUST trial // Circulation. 2010. Vol. 122. No. 4. Pp. 325–332.
doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.110.937409.
16. Ellenbogen K.A., Wilkoff B.L., Kay G.N. et al. Clinical Cardiac Pacing, Defibrillation and Resynchronization Therapy. 5th ed. Philadelphia: Elsevier, 2016. Pp. 456–478, 789–820.

Сведения об авторе

Смокотина О.Ф. — независимый исследователь, Красноярск. Сфера научных интересов: медицина, теория динамических систем, биофизика, безопасность имплантируемых

медицинских устройств. Автор концепции сверхлогики, изобретатель.