

Экстрасистолия как динамический выброс из аттрактора

Смокотина О.Ф. — независимый исследователь, Красноярск.

Цыкина Д.В. — Сибирский федеральный университет, Красноярск.

Аннотация

Экстрасистолия — одно из самых распространённых нарушений ритма, однако существующие классификации описывают её по морфологическим и локализационным признакам, не затрагивая динамическую природу явления. В статье предлагается рассматривать экстрасистолию как динамический выброс из текущего аттрактора сердечного ритма, который в ряде случаев может формировать устойчивые паттерны (бигеминия, тригеминия). Анализируются параметры выброса (амплитуда, время возврата, частота, интервал сцепления) и их возможная связь с устойчивостью аттрактора. Обсуждается гипотеза о том, что экстрасистолы могут выступать предвестниками бифуркации — перехода системы в другой динамический режим, в частности в фибрилляцию предсердий. Предложенные динамические параметры не заменяют существующие клинические критерии, а дополняют их количественной оценкой устойчивости аттрактора. Отдельного внимания заслуживает гипотеза о том, что экстрасистолы в норме выполняют адаптационную стабилизирующую функцию (Смокотина, 2026 [5]), и их подавление может не улучшать, а ухудшать прогноз.

Ключевые слова: экстрасистолия, динамический выброс, аттрактор, вариабельность сердечного ритма, бифуркация, фибрилляция предсердий, критическое замедление.

1. Введение: экстрасистолия — между событием и режимом

Экстрасистолия — преждевременное сокращение сердца, возникающее вне основного ритма. Это самое частое нарушение ритма: экстрасистолы регистрируются практически у каждого человека при суточном мониторинге, в том числе у здоровых людей. Медицинская классификация делит экстрасистолы по локализации (предсердные, желудочковые, узловые), по частоте (редкие, частые), по морфологии (мономорфные, полиморфные), по паттерну (одиночные, парные, групповые).

Эта классификация описывает форму явления, но не его динамическую сущность. С точки зрения теории динамических систем, экстрасистолия в большинстве случаев представляет собой кратковременный выброс из текущего аттрактора. Система на одно или несколько сокращений покидает область устойчивого ритма и либо возвращается обратно, либо переходит в другой режим.

Однако экстрасистолия не всегда является одиночным событием. В ряде случаев экстрасистолы формируют устойчивые паттерны — бигеминию (чередование нормального сокращения и экстрасистолы), тригеминию (два нормальных сокращения и экстрасистола) и более сложные ритмические рисунки. Такие паттерны могут сохраняться часами и представляют собой не одиночный выброс, а периодический или квазипериодический режим с регулярными выбросами. Это пограничный случай: экстрасистолия здесь уже не событие, но ещё не самостоятельный аттрактор.

Отдельного внимания заслуживает вопрос о функции экстрасистол в норме. Экстрасистолы регистрируются у всех здоровых людей, что заставляет предположить их адаптационную роль. В недавней работе (Смокотина, 2026 [5]) была выдвинута гипотеза о том, что экстрасистолы являются механизмом динамической стабилизации сердечного ритма: они сглаживают динамическую нагрузку на аттрактор, предотвращая накопление критического возбуждения. В рамках этой гипотезы опасные экстрасистолы (частые, с растущей амплитудой) являются не причиной дестабилизации, а индикатором возросшей нагрузки, которую система пытается компенсировать. Подавление таких экстрасистол может разрушить компенсаторный механизм и ухудшить прогноз.

Настоящая статья вводит параметры для количественного анализа экстрасистол как динамических выбросов. Эти параметры могут использоваться как для различения стабилизирующих и дестабилизирующих экстрасистол, так и для оценки близости системы к бифуркации.

2. Сердечный ритм как динамическая система с выбросами

Нормальный синусовый ритм — это не строго периодический процесс, а квазипериодический аттрактор с вариабельностью (Goldberger et al., 1990 [6]). Интервалы RR флуктуируют в определённой области, спектр имеет характер $1/f$. Система устойчива, но не жёстко фиксирована.

В любой динамической системе возможны флуктуации — случайные или индуцированные отклонения от аттрактора. В норме система быстро возвращается в область аттрактора после такого отклонения. Этот процесс характеризуется несколькими параметрами:

- Амплитуда выброса: насколько сильно отклонение от среднего ритма.
- Время возврата: через сколько сокращений ритм восстанавливается.
- Частота выбросов: как часто происходят отклонения.
- Интервал сцепления: точный момент возникновения экстрасистолы относительно предыдущего сокращения.

Когда система находится в устойчивом состоянии, выбросы редки, амплитуда невелика, возврат быстрый. Такие выбросы, согласно гипотезе об адаптационной роли экстрасистол [5], выполняют стабилизирующую функцию: они сглаживают динамическую нагрузку на аттрактор, предотвращая накопление критического возбуждения.

По мере приближения к бифуркации устойчивость аттрактора снижается. Это проявляется в критическом замедлении (*critical slowing down*): время возврата растёт, амплитуда флуктуаций увеличивается. Концепция критического замедления разработана для экологических и климатических систем (Scheffer et al., 2009 [7]); её применимость к сердечному ритму является гипотезой, требующей проверки. Если гипотеза верна, то экстрасистолы из редких становятся частыми, из одиночных — групповыми. Это не просто «много экстрасистол», а количественный индикатор приближающегося перехода. Важно подчеркнуть, что рост частоты и амплитуды экстрасистол в этой ситуации является не причиной дестабилизации, а реакцией системы на возросшую нагрузку — попыткой компенсировать её более интенсивными выбросами [5].

3. Параметры динамического выброса

Для количественного анализа экстрасистол как динамических выбросов предлагается набор параметров.

Амплитуда выброса (A). Определяется как нормированное отклонение RR-интервала экстрасистолы от среднего RR-интервала основного ритма:

$$A = |RR_{\text{экстра}} - RR_{\text{сред}}| / \sigma_{RR}$$

где $RR_{\text{сред}}$ — средний интервал основного ритма, σ_{RR} — его стандартное отклонение. Амплитуда $A = 1$ означает, что экстрасистола отклоняется на одно стандартное отклонение. $A > 3$ — сильный выброс.

Время возврата (τ). Число сокращений после экстрасистолы, через которое RR-интервал возвращается в пределы $RR_{\text{сред}} \pm \sigma_{RR}$. Для одиночной безопасной экстрасистолы τ обычно мало (1–3 сокращения). Увеличение τ может указывать на дестабилизацию аттрактора.

Частота выбросов (f). Число экстрасистол в час. Для здорового сердца f обычно не превышает нескольких десятков. Частота $> 100/\text{час}$ рассматривается как частая экстрасистолия. С точки зрения динамики важен не столько абсолютный порог, сколько тренд: растёт ли частота со временем? Рост f может указывать на увеличение динамической нагрузки, которую система пытается компенсировать [5].

Интервал сцепления (CI, coupling interval). Время от предыдущего нормального сокращения до экстрасистолы. Это ключевой параметр для оценки риска запуска фибрилляции. Если CI попадает в уязвимую фазу (частичная реполяризация), экстрасистола может запустить волну хаотической активности.

Постэкстрасистолическая пауза. Компенсаторная пауза после экстрасистолы. Её длительность связана с типом экстрасистолы (предсердная vs. желудочковая) и состоянием проводящей системы.

Кластеризация. Идут ли экстрасистолы равномерно или группируются? Появление групповых экстрасистол (пары, триплеты, короткие пробежки) может указывать на то, что система переходит на следующий уровень иерархической компенсации, пытаясь справиться с возросшей нагрузкой [5].

Устойчивость паттерна. В ряде случаев экстрасистолы формируют устойчивый ритмический рисунок — бигеминию, тригеминию и более сложные паттерны. С точки зрения динамики это периодический или квазипериодический режим с регулярными выбросами. Устойчивость такого паттерна может быть количественно оценена через стабильность интервала сцепления CI и частоты выбросов f во времени. Дестабилизация паттерна может служить индикатором приближающейся бифуркации — или, напротив, отражать адаптационный переход системы на более высокий уровень компенсации [5].

Предложенные параметры не заменяют существующие клинические критерии (такие как градация Лауна-Вольфа для желудочковых экстрасистол), а дополняют их количественной оценкой устойчивости аттрактора. Клинические критерии описывают

морфологию и частоту; динамические параметры оценивают, насколько система близка к порогу бифуркации и какую роль выполняют экстрасистолы в текущем режиме.

4. Экстрасистолы как предвестники бифуркации

Переход от нормального ритма к фибрилляции предсердий не происходит мгновенно. Ему предшествует период дестабилизации, во время которого динамические показатели меняются. Гипотеза критического замедления предсказывает, что перед бифуркацией время возврата в аттрактор растёт, а амплитуда флуктуаций увеличивается (Scheffer et al., 2009 [7]). Следует подчеркнуть, что эта концепция разработана для экологических и климатических систем, и её применимость к сердечному ритму является гипотезой, требующей эмпирической проверки.

Если данная гипотеза подтвердится для сердечного ритма, то экстрасистолы могут служить измеримым индикатором приближающегося перехода. Конкретные предсказания:

1. Рост частоты экстрасистол в период, предшествующий эпизоду фибрилляции.
2. Увеличение амплитуды выбросов (A растёт).
3. Увеличение времени возврата (τ растёт).
4. Дестабилизация устойчивых паттернов: если ранее стабильная бигеминия или тригеминия начинает менять интервал сцепления или частоту, это может указывать на приближение бифуркации.

Важно отметить, что рост этих показателей может отражать как дестабилизацию системы, так и интенсификацию компенсаторных механизмов [5]. Различение этих двух ситуаций требует дальнейших исследований.

5. Экстрасистолы как триггер фибрилляции

Особый случай — экстрасистола, которая непосредственно запускает эпизод фибрилляции. С точки зрения динамики это выброс, который не возвращается в аттрактор, а перебрасывает систему в другой режим.

Клиническая литература описывает феномен «предсердной экстрасистолы, запускающей фибрилляцию предсердий» (Haïssaguerre et al., 1998 [8]). Эктопический очаг в лёгочных венах генерирует импульс, который попадает в уязвимую фазу предсердной ткани и запускает множественные re-entry. С точки зрения динамики это бифуркация, индуцированная выбросом.

Количественный анализ таких событий может выявить параметры «опасной» экстрасистолы:

- Интервал сцепления CI , при котором экстрасистола с наибольшей вероятностью запускает фибрилляцию.
- Амплитуда выброса A — является ли триггерная экстрасистола более сильным выбросом, чем нетриггерные?
- Состояние аттрактора перед выбросом — была ли система уже дестабилизирована (повышенная частота экстрасистол, увеличенное τ), или выброс произошёл на фоне устойчивого ритма?

С точки зрения динамики, интервал сцепления определяет, в какой фазе аттрактора происходит выброс. Выброс в уязвимую фазу равносителен возмущению, подаваемому в момент максимальной чувствительности системы к внешнему воздействию. Если окажется, что триггерные экстрасистолы имеют характерные значения CI и возникают на фоне уже дестабилизированного аттрактора, это открывает возможность прогнозирования: не ждать фибрилляции, а замечать состояние, в котором она вероятна. Вместе с тем, как отмечено в [5], такие экстрасистолы могут быть не причиной, а следствием — индикатором того, что система уже находится в критическом состоянии и пытается компенсировать нагрузку.

6. Ограничения и открытые вопросы

Валидация параметров. Предложенные параметры (A , τ , CI , f) являются теоретическими и требуют эмпирической валидации на клинических данных. Их способность различать стабилизирующие и дестабилизирующие экстрасистолы не проверена.

Применимость *critical slowing down* к сердцу. Концепция критического замедления разработана для экологических и климатических систем. Её применимость к сердечному ритму является гипотезой. Даже если качественная аналогия верна, количественные пороги (насколько должны вырасти A и τ , чтобы считать систему предоступной) не установлены.

Механизм генерации экстрасистол. Динамическая модель описывает выброс, но не объясняет, почему он возникает. Эктопический очаг, триггерная активность, ранняя или поздняя постдеполяризация — эти электрофизиологические механизмы находятся на другом уровне описания. Стыковка динамического и электрофизиологического уровней — отдельная задача.

Индивидуальная вариабельность. Порог безопасности для одного пациента может быть нормой для другого. Что считать «опасной» частотой экстрасистол — 100/час или 1000/час? Абсолютные пороги, вероятно, индивидуальны, тогда как тренды (рост частоты, рост амплитуды) более универсальны.

Экстрасистолы при структурных заболеваниях сердца. Постинфарктный кардиосклероз, кардиомиопатии меняют саму ткань миокарда. Динамика экстрасистол на фоне структурной патологии может отличаться от динамики на здоровом сердце.

Устойчивые паттерны и блокады. Бигеминия, тригеминия и другие устойчивые паттерны занимают промежуточное положение между одиночным выбросом и самостоятельным режимом. Их взаимодействие с нарушениями проводимости требует отдельного анализа. В частности, открытым остаётся вопрос о том, являются ли эти паттерны проявлением иерархической компенсации, как предполагается в [5].

Верификация гипотез. Проверка высказанных гипотез и количественный анализ экстрасистол по предложенным параметрам составляют следующую фазу исследования и потребуют привлечения клинических данных.

7. Заключение

Экстрасистолия — не просто «лишнее сокращение», а динамический выброс из аттрактора, параметры которого могут служить индикатором устойчивости сердечного ритма. В ряде случаев экстрасистолы формируют устойчивые паттерны (бигеминия, тригеминия), занимающие промежуточное положение между событием и режимом. Переход от описательной классификации к количественному анализу выбросов открывает путь к прогнозированию аритмий: не ждать фибрилляции, а замечать состояние, в котором она вероятна.

Предложенные параметры выброса (A , τ , Cl , f) дополняют существующие клинические критерии количественной оценки устойчивости аттрактора. Их валидация на клинических данных составляет следующую фазу исследования. Особого внимания заслуживает вопрос о том, являются ли экстрасистолы при определённых условиях механизмом динамической стабилизации, а не патологией, — этот вопрос подробно рассмотрен в [5].

Литература

1. Смокотина О.Ф. Аритмии как режимы динамического хаоса: возможности классификации на основе теории динамических систем. — Препринт. — PREPRINTS.RU, 2026.
2. Смокотина О.Ф., Цыкина Д.В. Нарушения проводимости как разрыв связи между нелинейными осцилляторами. — Препринт. — PREPRINTS.RU, 2026.
3. Смокотина О.Ф., Цыкина Д.В. Устойчивость динамического режима как критерий доброкачественности аритмий. — Препринт. — PREPRINTS.RU, 2026.
4. Смокотина О.Ф., Цыкина Д.В. Кардиостимулятор как искусственная динамическая связь: от жёсткого ритма к управлению хаосом. — Препринт. — PREPRINTS.RU, 2026.
5. Смокотина О.Ф. Экстрасистолия как адаптационный механизм сердечного ритма: от динамической стабилизации к иерархической компенсации. — Препринт. — PREPRINTS.RU, 2026.
6. Goldberger A.L., Rigney D.R., West B.J. Chaos and Fractals in Human Physiology // *Scientific American*. — 1990. — Vol. 262. — Pp. 42–49.
7. Scheffer M., Bascompte J., Brock W.A. et al. Early-Warning Signals for Critical Transitions // *Nature*. — 2009. — Vol. 461. — Pp. 53–59.
8. Haïssaguerre M., Jaïs P., Shah D.C. et al. Spontaneous Initiation of Atrial Fibrillation by Ectopic Beats Originating in the Pulmonary Veins // *New England Journal of Medicine*. — 1998. — Vol. 339. — No. 10. — Pp. 659–666.

References

1. Smokotina O.F. Aritmii kak rezhimy dinamicheskogo khaosa: vozmozhnosti klassifikatsii na osnove teorii dinamicheskikh sistem [Arrhythmias as Regimes of Dynamic Chaos: Classification Potential Based on Dynamical Systems Theory]. Preprint. PREPRINTS.RU, 2026. (In Russian)
2. Smokotina O.F., Tsykina D.V. Narusheniya provodimosti kak razryv svyazi mezhdru nelineinymi ostsillyatorami [Conduction Disorders as a Breakdown of Coupling Between Nonlinear Oscillators]. Preprint. PREPRINTS.RU, 2026. (In Russian)
3. Smokotina O.F., Tsykina D.V. Ustoichivost' dinamicheskogo rezhima kak kriterii dobrokachestvennosti aritmii [Stability of the Dynamic Regime as a Criterion for Benign Arrhythmias]. Preprint. PREPRINTS.RU, 2026. (In Russian)

4. Smokotina O.F., Tsykina D.V. Kardiostimulyator kak iskusstvennaya dinamicheskaya svyaz': ot zhestkogo ritma k upravleniyu khaosom [Cardiac Pacemaker as an Artificial Dynamic Link: From Rigid Rhythm to Chaos Control]. Preprint. PREPRINTS.RU, 2026. (In Russian)
5. Smokotina O.F. Ekstrasistoliya kak adaptatsionnyi mekhanizm serdechnogo ritma: ot dinamicheskoi stabilizatsii k ierarkhicheskoi kompensatsii [Extrasystole as an Adaptive Mechanism of Heart Rhythm: From Dynamic Stabilization to Hierarchical Compensation]. Preprint. PREPRINTS.RU, 2026. (In Russian)
6. Goldberger A.L., Rigney D.R., West B.J. Chaos and Fractals in Human Physiology. Scientific American, 1990, vol. 262, pp. 42–49.
7. Scheffer M., Bascompte J., Brock W.A. et al. Early-Warning Signals for Critical Transitions. Nature, 2009, vol. 461, pp. 53–59.
8. Haïssaguerre M., Jaïs P., Shah D.C. et al. Spontaneous Initiation of Atrial Fibrillation by Ectopic Beats Originating in the Pulmonary Veins. New England Journal of Medicine, 1998, vol. 339, no. 10, pp. 659–666.

Сведения об авторах:

Смокотина О.Ф. — независимый исследователь, Красноярск. Сфера научных интересов: теория динамических систем, гносеология, математическое моделирование в кардиологии. Автор концепции сверхлогики.

Цыкина Д.В. — Сибирский федеральный университет, Красноярск. Сфера научных интересов: прикладная математика, анализ временных рядов, динамические системы.