

Научная статья

УДК 519.248:612.17

DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ КАРДИОИНТЕРВАЛОВ

Виолетта Вячеславовна Григоренко^{1✉}, Нина Борисовна Назина²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ grigv_84@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-9073-4184>

² nnb60@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9363-160X>

Аннотация. В статье проведен анализ литературных источников, в которых рассматривается применение контрольных карт Шухарта для различных сфер применения, приводят примеры использования предложенного статистического метода в медицине. Показано, что применение контрольных карт Шухарта для целей прогнозирования наступления критических состояний в работе биосистемы и ее параметров (на примере временных рядов кардиоинтервалов сердечно-сосудистой системы) позволяет идентифицировать ситуации, характерные для процесса перехода из одного функционального состояния в другое (в том числе патологическое).

Ключевые слова: кардиоинтервал, временной ряд, контрольная карта Шухарта, карта средних значений, карта размахов

Для цитирования: Григоренко В. В., Назина Н. Б. Применение метода контрольных карт при исследовании хаотической динамики кардиоинтервалов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 4. С. 11–17. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-2.

Original article

METHOD OF CONTROL CHARTS FOR STUDYING CHAOTIC DYNAMICS OF RR INTERVALS

Violetta V. Grigorenko^{1✉}, Nina B. Nazina²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ grigv_84@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-9073-4184>

² nnb60@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9363-160X>

Abstract. The article analyzes literature on the use of Shewhart control charts for various purposes and presents examples of applying a proposed statistical method in medicine. The study demonstrates that it is possible to identify situations common for the transferring stage from one functional condition to another (including pathologic one) using Shewhart control charts for prediction of critical conditions in the biosystem and its parameters (on the example of time series of cardiovascular system's RR intervals).

Keywords: RR interval, time series, Shewhart control chart, mean chart, range chart

For citation: Grigorenko V. V., Nazina N. B. Method of control charts for studying chaotic dynamics of RR intervals. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):11–17. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-2.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов прогнозирования вероятного наступления критических состояний в работе сложной динамической системы является метод контрольных карт Шухарта (ККШ). Сначала контрольные карты использовали в промышленности для анализа управления и производственных процессов [1, 2], потом

область применения ККШ существенно расширилась, их стали применять в гуманитарных науках и образовании [3]. Согласно данным зарубежных источников, метод ККШ становится популярным в медицинской практике [4, 5] для проведения лабораторных исследований в биохимии (количественный химический анализ, измерение интегральных показателей

объектов окружающей среды, показателей качества продуктов нефтехимии и т. д.) [6]; для оценки влияния изменений или вмешательств в процесс организации здравоохранения на его качество [7]; для прогнозирования критических состояний в послеоперационный период, а также контроля факторов риска пациентов в сосудистом отделении интенсивной терапии [8]; измерения для систематического контроля процессов динамики заживления пролежней у пациентов при различных заболеваниях [9]. Однако в российских источниках упоминаний использования ККШ для временных рядов, описывающих состояния биосистемы, не найдено.

Вариабельность (изменчивость) играет очень важную роль в современном мире, при этом немногие исследователи используют данный метод, а его практическая реализация движется крайне медленно, поскольку большинству привычны детерминистские суждения [10]. По утверждению У. Шухарта, «...любые процессы подвержены вариабельности, но некоторые из них обладают управляемой вариабельностью, а некоторые – неуправляемой».

Существуют некоторые неправильные представления относительно использования ККШ, что они якобы применимы только к данным с нормальными законами распределения; работают в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятности; работают только в том случае, если данные независимы; не могут быть применимы к данным с автокорреляцией; применимы только в статистически контролируемом состоянии [11]. В теории контрольных карт различают два типа изменчивости:

1. Контролируемая изменчивость, структура которой стабильна во времени, является действием «случайных» причин.

2. Неконтролируемая изменчивость, структура которой меняется с течением времени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основной цели использования ККШ можно выделить обнаружение неестественных изменений в рядах данных из повторяющихся процессов и критериев для определения отсутствия статистической управляемости, т. е. «...карта Шухарта – это график значений определенных характеристик подгрупп в зависимости от их номера (или графическое представление, использующее статистические подходы)» [11]. Карта имеет осевую линию (CL), которая соответствует эталонному значению характеристики. На ККШ также есть определяемые контрольные границы относительно центральной линии: верхняя контрольная граница (UCL); нижняя контрольная граница (LCL) (рис. 1). Для анализа изменчивости параметров применяются карты средних значений ($\bar{X}$ -карта) и карты размахов (R -карта). На $\bar{X}$ -карту наносятся значения выборочных средних значений для контроля отклонения непрерывной переменной от среднего значения. На контрольную R -карту наносятся значения размахов выборок для контроля за степенью изменчивости непрерывного параметра. Также для анализа ККШ используются двух- и трехсигмовые границы. Для этого контрольную карту делят на шесть равных зон шириной Δ , расположенных симметрично центральной линии (рис. 1). Контрольные границы находятся на расстоянии $\pm 3\sigma$ от центральной линии. Если точки разбросаны вокруг центральной линии в пределах контрольных границ, нет серий и трендов, считается, что процесс находится в статистически контролируемом состоянии [12].

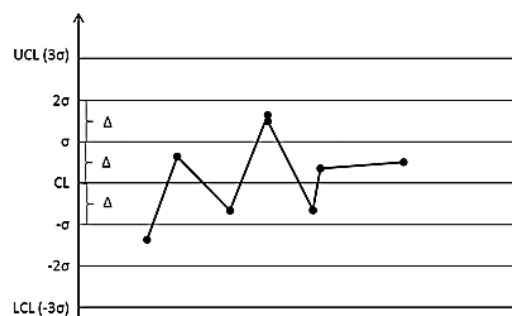


Рис. 1. Вид контрольной карты
Примечание: составлено авторами.

Для чтения ККШ необходимо использовать список правил (P_i), в соответствии с которым визуально оценивается статистическая управляемость процесса и прогнозируется его дальнейшая работа и поведение [13].

В представленном исследовании авторов статьи был разработан алгоритм прогнозирования критических состояний в работе параметров кардиосигнала (рис. 2). Представленный алгоритм позволил обнаружить особые изменения во временных рядах кардиоинтервалов и дать критерии для обнаружения нару-

шения статистической управляемости. Вывод о выходе процесса из устойчивого состояния делается на основе появления ситуации, соответствующей какому-либо правилу. Для вывода необходимо выполнение хотя бы одного правила. В исследовании использовались правила: 1) значение выше $\pm 3\sigma$; 2) 2 из 3 точек выше $\pm 2\sigma$; 3) 4 из 5 точек выше $\pm \sigma$; 4) 8 точек выше (ниже) среднего значения; 5) 6 точек по возрастанию (убыванию); 6) 14 точек подряд попеременно.

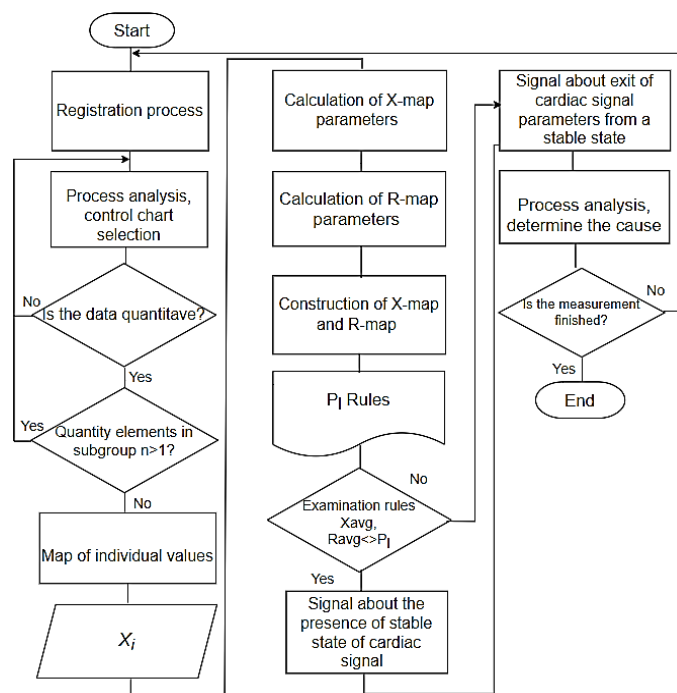


Рис. 2. Алгоритм прогнозирования критических состояний в работе параметров кардиосигнала

Примечание: составлено авторами.

В эксперименте приняли участие 6 представительниц коренных малочисленных народов Севера в возрасте от 18 до 70 лет. Они были разбиты на две группы со схожим условным функциональным состоянием сердечно-сосудистой системы в каждой группе: нормогенез – 3 человека, патогенез – 3 человека [14].

При помощи пульсоксиметра Элокс-01 М с одного из пальцев испытуемых в течение 5-минутного интервала в положении сидя в спокойном состоянии была зарегистрирована пульсовая волна [15]. В качестве объекта исследования из всей пульсовой волны был взят кардиоинтервал. Кардиоинтервалы – это интервалы между последовательными ударами

сердца, характеризующими его работу, измеряемые в миллисекундах [16].

Использование группового подхода к построению карт нецелесообразно, поскольку исходные данные были получены в результате разовых экспериментов в условиях удаленного проживания коренных народов Севера. Поэтому для прогнозирования изменений состояния сердечно-сосудистой системы применяли карты индивидуальных значений [16]. При использовании карт индивидуальных значений рациональные подгруппы для обеспечения оценки изменчивости внутри группы не применяют, и контрольные границы рассчитывают на основе меры вариации, полученной

по скользящим размахам двух наблюдений. На основе скользящих размахов вычисляют средний скользящий размах, который используют для построения контрольных карт [17].

Важно отметить, что тип распределения случайных величин неважен при построении ККШ: карты размахов и средних устойчивы по отношению к тем отклонениям от нормальности, которые встречаются в данных кардиоинтервалов. Этим картам можно доверять: они будут хорошо работать даже в том случае, когда закон распределения отличается от нормального. Формулы для построения контрольных карт подробно представлены в источнике [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После вычисления контрольных границ и построения самой ККШ было проведено

сравнение нанесенных точек средних и размахов с контрольными границами. Точки за пределами контрольных границ, необычные структуры и тенденции выделяются, чтобы указать на завершение процесса статистически стабильного состояния. Для каждого сигнала о выходе процесса из статистически стабильного состояния проведен анализ, чтобы определить причину выхода процесса из статистически контролируемого состояния.

На рис. 3 и 4 представлены примеры использования ККШ индивидуальных значений для испытуемой в возрасте 49 лет в состоянии условного нормогенеза (рис. 3А, В) и для испытуемой в возрасте 29 в состоянии условной патологии (рис. 4А, В) по правилу: если значения выходят за пределы $\pm 3\sigma$, то процесс вскоре выйдет из устойчивого состояния (далее правило $\pm 3\sigma$).

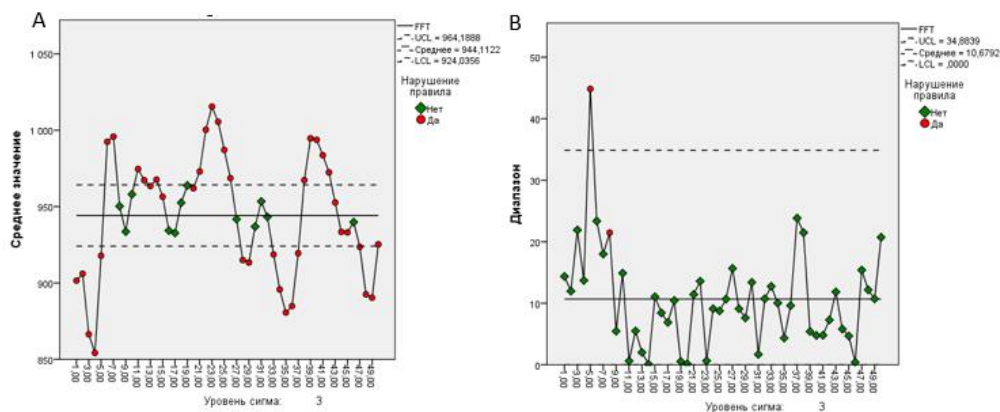


Рис. 3. Контрольная карта индивидуальных значений для испытуемой в возрасте 49 лет в состоянии условного нормогенеза:

А) X-карта, В) R-карта

Примечание: составлено авторами.

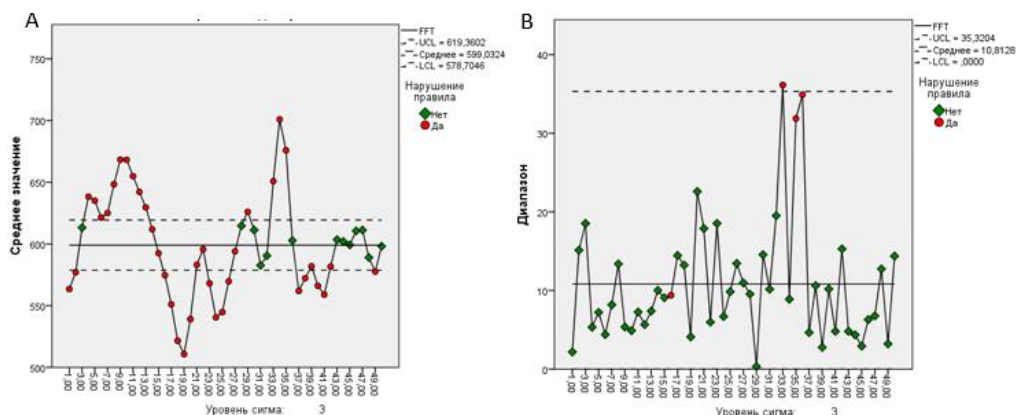


Рис. 4. Контрольная карта индивидуальных значений для испытуемой в возрасте 29 лет в состоянии условной патологии:

А) X-карта, В) R-карта

Примечание: составлено авторами.

На контрольных X -картах (рис. 3А, 4А) красным цветом отмечено выполнение правила $\pm 3\sigma$. Также правило выполнено и на R -картах (рис. 3В, 4В), т. е. вариация данных неста-

бильна при переходе от одной подгруппы к другой. Результаты работы контрольных карт представлены в таблице.

Таблица

Результаты выполнения правил во временных рядах кардиоинтервалов испытуемых в различных функциональных состояниях

Группа	Возраст	Правила						
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	Все
		Количество точек, соответствующих выполнению правил						
№ 1: нормогенез	18	3	38	38	24	-	-	103
	49	-	40	32	2	4	-	78
	70	-	39	30	10	6	-	85
	Итого нарушений по группе	3	117	100	36	10	-	266
№ 2: патогенез	29	7	45	62	30	5	-	149
	46	6	49	40	12	4	-	111
	64	5	45	45	25	9	1	130
	Итого нарушений по группе	18	139	147	67	18	1	390

Примечание: составлено авторами.

Как видно из таблицы, количество выполнения правил в большей степени характерно для группы с вероятными признаками патологий:

1. Правило № 1 (значение выше/ниже $\pm 3\sigma$) в группе нормогенеза выполнилось 3 раза, в группе патогенеза – 18 раз.

2. Правило № 2 (2 из 3 точек выше/ниже $\pm 2\sigma$) в группе нормогенеза выполнилось 117 раз, в группе патогенеза – 139 раз.

3. Правило № 3 (4 из 5 точек выше/ниже $\pm \sigma$) в группе нормогенеза выполнилось 100 раз, в группе патогенеза – 147 раз.

4. Правило № 4 (8 точек выше/ниже среднего значения) в группе нормогенеза выполнилось 36 раз, а для группы с патологией почти в 2 раза больше – 67 раз.

5. Правило № 5 (6 точек по возрастанию/убыванию) выполнилось для группы нормогенеза 10 раз, для группы патогенеза – 18 раз.

6. Правило № 6 (14 точек подряд попеременно) в первом случае не выполнилось, что говорит о стабильном состоянии параметров кардиосигнала, в отличие от группы с пато-

логией, в которой присутствует один человек с выполнением данного правила.

Общее количество выполнения всех правил для группы нормогенеза составило 266 раз, а для группы с патологией сердечно-сосудистой системы – 390 раз. В результате удалось зафиксировать изменения в процессе работы сердца для группы в нормогенезе в 29 % всех случаев и для группы в патогенезе – в 43 % всех случаев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный алгоритм позволил идентифицировать ситуации, характерные для процесса перехода из одного функционального состояния в другое (в том числе патологическое). Количество выполнения правил в большей степени характерно для группы с вероятными признаками патологий, в отличие от группы в нормогенезе. Выполнение правила говорит о ближайшем выходе процесса из состояния устойчивого равновесия, что в нашем случае характерно для сбоя в работе сердечно-сосудистой системы или ее параметров.

Список источников

1. Shewhart W. A. Economic control of quality of manufactured product. Milwaukee, Wis: American Society for Quality Control; 1980. 501 p.

References

1. Shewhart W. A. Economic control of quality of manufactured product. Milwaukee, Wis: American Society for Quality Control; 1980. 501 p.

2. Адлер Ю. П., Жулинский С. Ф., Шпер В. Л. Проблемы применения методов статистического управления процессами на отечественных предприятиях // Методы менеджмента качества. 2009. № 8. С. 36–40.
3. Gitlow H. S. Viewing statistics from a quality control perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2001;18(2):169–179.
4. Balestracci D. Jr. Data Sanity: A quantum leap to unprecedented results. Englewood: Medical Group Management Association; 2009. 326 p.
5. Carey R. G. Quality with confidence in healthcare: A practical guide to quality improvement in healthcare. Chicago, IL: SPSS; 1997. 218 p.
6. Меньшиков В. В. Лабораторные методы исследований в клинике. М.: Медицина, 1987. 368 с.
7. Slyngstad L. The contribution of variable control charts to quality improvement in healthcare: A literature review. *J Healthcare Leadership*. 2021;13:221–230.
8. Mathis M. R., Engoren M. C., Williams A. M. et al. Prediction of postoperative deterioration in cardiac surgery patients using electronic health record and physiologic waveform data. *Anesthesiology*. 2022;137(5):586–601.
9. Clark M., Young T., Fallon M. Systematic review of the use of statistical process control methods to measure the success of pressure ulcer prevention. *Int Wound J*. 2018;15(3):391–401.
10. Shewhart W. A. Statistical methods from the viewpoint of quality control. New York: Dover Publications, Inc.; 1986. 155 p.
11. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. М.: Альпина Паблишер, 2016. 409 с.
12. Шайторова И. А., Микшина В. С., Назина Н. Б. Прогнозирование внештатных ситуаций в электроэнергетике на основе методов статистического управления // Вестник кибернетики. 2015. № 3. С. 203–211.
13. ГОСТ Р 50779.40-96. Статистические методы. Контрольные карты. Общее руководство и введение. М.: Стандартинформ, 1996. 14 с.
14. Вандымова Ю. Т., Григоренко В. В., Микшина В. С. Прогнозирование наступления критических состояний работы сердечно-сосудистой системы коренного и пришлого населения Севера РФ // Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов: сб. ст. Первой междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, состоявшейся в рамках мероприятий Первого междунар. молодежного науч.-практ. форума «Нефтяная столица», 08–09 февраля 2018 г., г. Сургут. Сургут: СурГУ, 2018. С. 45–53.
15. Grigorenko V. V., Bashkatova Y. V., Shakirova L. S. et al. New information technologies in the estimation of stationary modes of the third type systems. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*. 2020;862(5):052034.
2. Adler Yu. P., Zhulinsky S. F., Shper V. L. Problemy primeneniia metodov statisticheskogo upravleniia protsessami na otechestvennykh predpriiatiakh. *Methods of Quality Management*. 2009;(8):36–40. (In Russian).
3. Gitlow H. S. Viewing statistics from a quality control perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2001;18(2):169–179.
4. Balestracci D. Jr. Data Sanity: A quantum leap to unprecedented results. Englewood: Medical Group Management Association; 2009. 326 p.
5. Carey R. G. Quality with confidence in healthcare: A practical guide to quality improvement in healthcare. Chicago, IL: SPSS; 1997. 218 p.
6. Menshikov V. V. Laboratornye metody issledovaniia v klinike. Moscow: Meditsina; 1987. 368 p. (In Russian).
7. Slyngstad L. The contribution of variable control charts to quality improvement in healthcare: A literature review. *J Healthcare Leadership*. 2021;13:221–230.
8. Mathis M. R., Engoren M. C., Williams A. M. et al. Prediction of postoperative deterioration in cardiac surgery patients using electronic health record and physiologic waveform data. *Anesthesiology*. 2022;137(5):586–601.
9. Clark M., Young T., Fallon M. Systematic review of the use of statistical process control methods to measure the success of pressure ulcer prevention. *Int Wound J*. 2018;15(3):391–401.
10. Shewhart W. A. Statistical methods from the viewpoint of quality control. New York: Dover Publications, Inc.; 1986. 155 p.
11. Wheeler D. J., Chambers D. S. Understanding statistical process control. Moscow: Alpina Publisher; 2016. 409 p. (In Russian).
12. Shaitorova I. A., Mikshina V. S., Nazina N. B. Emergency situations forecasting in power industry with statistical control methods. *Proceedings in Cybernetics*. 2015;(3):203–211. (In Russian).
13. GOST (State Standard) R 50779.40-96. Statistical methods. Control charts. General guide introduction. Moscow: Standartinform; 1996. 14 p. (In Russian).
14. Vandymova Yu. T., Grigorenko V. V., Mikshina V. S. Prediction of cardiovascular system critical condition in native and alien population of the Russian North. In: *Proceedings of the First International Research-to-Practice Conference for Young Scientists and Specialists “Tekhnologii budushchego neftegazodobyvaiushchikh regionov”* as a part of the First International Youth Applied Forum “Oil Capital”, February 8–9, 2018, Surgut. Surgut: SurSU; 2018. p. 45–53. (In Russian).
15. Grigorenko V. V., Bashkatova Y. V., Shakirova L. S. et al. New information technologies in the estimation of stationary modes of the third type systems. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*. 2020;862(5):052034.
16. Eskov V. M., Khadartsev A. A., Kozlova V. V. et al. Sistemnyi analiz, upravlenie i obrabotka informatsii v biologii i meditsine. Vol. XI. Sistemnyi sintez parametrov funktsii organizma zhitelei Iugry na baze neirokompiutina i teorii khaos-samoorganizatsii

16. Еськов В. М., Хадарцев А. А., Козлова В. В. и др. Системный анализ, управление и обработка информации в биологии и медицине. Т. XI. Системный синтез параметров функций организма жителей Югры на базе нейрокомпьютинга и теории хаос-самоорганизации в биофизике сложных систем : моногр. Самара : Офорт, 2014. 192 с.
17. Wheeler D. J., Chambers D. S. Understanding statistical process control. Knoxville, Tenn.: SPC Press; 1992. 406 p.
17. Wheeler D. J., Chambers D. S. Understanding statistical process control. Knoxville, Tenn.: SPC Press; 1992. 406 p.
17. Wheeler D. J., Chambers D. S. Understanding statistical process control. Knoxville, Tenn.: SPC Press; 1992. 406 p.

Информация об авторах

В. В. Григоренко – старший преподаватель.
Н. Б. Назина – доцент.

Information about the authors

V. V. Grigorenko – Senior Lecturer.
N. B. Nazina – Docent.