

Возможности системы искусственного интеллекта в распознавании смещения и перестановки электрокардиографических электродов в сравнении с экспертным врачебным анализом

Д.В. Шутов¹, Д.В. Дроздов², И.Л. Козловская², Н.Н. Оськин³, М.Р. Богданов⁴, А.А. Попов¹, Ю.С. Берг⁵, А.В. Иванова⁶, А.А. Леонтьева⁶, Е.Д. Малько⁶, А.К. Пром⁷, А.А. Унагаева⁸, А.Ю. Чернякова⁹, Т.М. Бобровская¹, К.М. Арзамасов¹, Ю.А. Васильев¹

¹ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация

² Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии имени академика Е.И. Чазова, Москва, Российская Федерация

³ ООО «Сибирская телеметрическая компания», Уфа, Российская Федерация

⁴ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

⁵ Красногорская городская больница, поликлиника № 4, Красногорск, Российская Федерация

⁶ Республиканский центр общественного здоровья и медицинской профилактики, лечебной физкультуры и спортивной медицины, Чебоксары, Российская Федерация

⁷ Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Российская Федерация

⁸ Городская поликлиника № 4, Иркутск, Российская Федерация

⁹ ООО «МРТ Центр Рыбцокое», Санкт-Петербург, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Обоснование. Неправильное расположение электродов электрокардиографа является одним из наиболее распространенных нарушений методики регистрации электрокардиограммы. **Цель** – сравнить эффективность системы искусственного интеллекта и врачебного анализа в распознавании электродов при регистрации электрокардиограмм. **Материалы и методы.** Работа включала три этапа: 1) формирование двух наборов данных электрокардиографий: обучающая выборка с правильным наложением электродов (262 электрокардиограммы у 27 пациентов), а также тестовая выборка с различными вариантами смещения и перестановки электродов (59 электрокардиограмм у 6 пациентов); 2) обучение системы искусственного интеллекта для корректного аннотирования вариантов неправильной установки электродов; 3) тестирование системы искусственного интеллекта и сравнение ее результатов с показателями врачебного анализа. Электрокардиограммы, включенные в тестовую выборку, представлены на веб-платформе. **Результаты.** По сравнению с врачебным анализом, работа алгоритма характеризуется большей точностью и стабильностью в выявлении факта некорректного позиционирования электродов (площадь под ROC-кривой: >0,81 против 0,58 соответственно), а также точно определяет большее количество вариантов ошибок (5 из 9 против 3 из 9). Классы ошибок регистрации, в выявлении которых врачебный и автоматический анализ оказались наиболее эффективными, различались. **Заключение.** В соответствии с полученными результатами, возможности распознавания некорректного наложения электродов, продемонстрированные системой искусственного интеллекта, сопоставимы с показателями диагностической точности врачебного анализа. В целом работа алгоритма характеризуется большей специфичностью и стабильностью. Целесообразно совершенствование алгоритма и проведение дальнейших исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрокардиограмма, электрокардиография, дефекты регистрации электрокардиограммы, искусственный интеллект, алгоритмы, функциональная диагностика.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The recognition accuracy of electrocardiographic electrodes misplacement by an artificial intelligence system compared to medical experts

Dmitry V. Shutov¹, Dmitry V. Drozdov², Irina L. Kozlovskaya², Nikolai N. Oskin³, Marat R. Bogdanov⁴, Alexey A. Popov¹, Yulia S. Berg⁵, Anna V. Ivanova⁶, Anna A. Leontyeva⁶, Elena D. Malko⁶, Albert K. Prom⁷, Anna A. Unagaeva⁸, Anna Yu. Chernyakova⁹, Tatiana M. Bobrovskaya¹, Kirill M. Arzamasov¹, Yurii A. Vasiliev¹

¹ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation

² National Medical Research Centre of Cardiology Named After Academician E.I. Chazov, Moscow, Russian Federation

³ Siberian Telemetry Company LLC, Ufa, Russian Federation

⁴ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

⁵ Krasnogorsk City Hospital, Krasnogorsk, Russian Federation

⁶ Chuvash Republic Center for Public Health and Medical Prevention, Physical Therapy and Sports Medicine, Cheboksary, Russian Federation

⁷ Volgograd State Medical University, Volgograd, Russian Federation

⁸ Irkutsk City Clinic № 4, Irkutsk, Russian Federation

⁹ MRI Center Rybatskoe LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

SUMMARY

Background: electrocardiographic electrodes misplacement represents one of the most common recording technique errors. **Aim:** to compare the accuracy of an artificial intelligence software in recognizing misplacement of electrocardiographic electrodes with human analysis by medical experts. **Materials and methods:** the work was carried out in 3 stages: 1) two electrocardiography datasets with correctly and erroneously positioned electrodes were generated: the training sample (262 electrocardiograms of 27 patients) and the test sample (59 electrocardiograms of 6 patients); 2) artificial intelligence system was trained to correctly annotate electrodes misplacement; 3) testing an artificial intelligence and comparison of its results with the indicators of analysis by doctors-specialists in the field of cardiology. **Results:** compared to the doctors, the artificial intelligence algorithm functioned more precise and stable in recognizing incorrect electrodes positioning (area under ROC-curve: >0.81 vs 0.58). It also discriminated more error classes (5 of 9 vs. 3 of 9). Doctors and the artificial intelligence system The error classes that were shown to be better determined by the doctors differed from those that were better determined by the algorithm. **Conclusion:** according to the obtained results, the capability of recognizing incorrect electrode placement demonstrated by the artificial intelligence system is comparable to the diagnostic accuracy of medical analysis. In general, the algorithm's operation is characterized by greater specificity and stability. It is advisable to improve the algorithm and conduct further research.

KEYWORDS: electrocardiogram, electrocardiography, defects in electrocardiogram registration, artificial intelligence, algorithms, clinical physiology.

CONFLICT OF INTEREST. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Обоснование

Электрокардиография – доступный и высоко информативный метод исследования сердечно-сосудистой системы. При обследовании пациентов с кардиоваскулярной патологией, а также при диспансеризации населения, регистрация электрокардиограммы (ЭКГ) является обязательной. По данным Департамента здравоохранения Москвы, за 2023 г. в медицинских организациях города было зарегистрировано 4,8 млн ЭКГ.

Одной из наиболее распространенных технических проблем, связанных с регистрацией ЭКГ и способных приводить к ошибочной интерпретации, является некорректное наложение электродов. Так, по данным литературы, ошибки подобного рода совершают до 50–60% представителей среднего медицинского персонала [1–4], что может приводить к ложной интерпретации в 17–24% случаев [5], в том числе к невыявлению 11% пациентов с острым коронарным синдромом [6].

Учитывая значимость технических аспектов регистрации ЭКГ, Российским кардиологическим обществом, Российской ассоциацией специалистов функциональной диагностики, Российским обществом холтеровского мониторирования и неинвазивной электрокардиологии и Ассоциацией детских кардиологов России были подготовлены соответствующие методические рекомендации [7].

С целью автоматизации выявления наиболее частых вариантов неправильного позиционирования электродов (перестановка электродов на руках, на левых руке

и ноге, грудных – выше или ниже стандартной схемы) были предложены специальные алгоритмы, однако их эффективность была показана преимущественно в распознавании перестановки электродов конечностей [8–20]. Таким образом, проблема разработки алгоритмов для выявления смещения и перестановки электродов сохраняет свою актуальность.

Кроме того, остаются не решенными многие методические вопросы валидации и оценки эффективности создаваемых алгоритмов. Настоящее исследование было проведено в соответствии с первым сценарием, изложенным в Приложении А ГОСТ Р 59921.9–2022¹. Следует отметить, что в данном документе подчеркивается необходимость тестирования корректности входных данных.

Цель

Сравнить эффективность распознавания смещения и перестановки электродов при регистрации ЭКГ между системой искусственного интеллекта (СИИ) и врачами, специализирующимися в области ЭКГ.

Материалы и методы**Формирование обучающей и тестовой выборки**

В исследование было включено 49 пациентов. Во время визита у каждого пациента была зарегистрирована ЭКГ с корректным наложением электродов, а также несколько ЭКГ с различными вариантами нарушений позиционирования (табл. 1). Всего было зарегистрировано 486 ЭКГ [26].

Таблица 1
Варианты расположения электродов и их кодировка

Формулировка на русском	Английский эквивалент
Стандартное расположение электродов	Standard electrodes' arrangement
Грудные электроды: на 2 межреберья выше стандартной схемы	Precordial electrodes' misplacement: up to 2 intercostal spaces above the standard arrangement
Грудные электроды: на 2 межреберья ниже стандартной схемы	Precordial electrodes' misplacement: below to 2 intercostal spaces down the standard arrangement
Перестановка: красный (R) и жёлтый (L) электроды	Reversal of the two arm electrodes
Перестановка: жёлтый (L) и зелёный (F) электроды	Reversal of the left arm and left leg electrodes
Все грудные электроды (C1–C6) расположены на прямой линии	All chest electrodes are placed at the same line
Перестановка: электроды C1 и C2	Reversal of the C1 and C2 electrodes
Перестановка: электроды C5 и C6	Reversal of the C5 and C6 electrodes
Электроды C4, C5, C6 расположены слишком близко друг к другу (соприкасаются)	The C4, C5, C6 electrodes are placed too close to each other (cheek to cheek)
Электроды C4, C5, C6 расположены в пятом межреберье (не по горизонтальной линии, а по направлению вверх)	The C4, C5, C6 electrodes are misplaced along the intercostal space (not at a horizontal line, but curved upwards)

¹ ГОСТ Р 59921.9–2022 «Системы искусственного интеллекта в клинической медицине. Алгоритмы анализа данных в клинической физиологии. Методы испытаний. Общие требования». Режим доступа: <https://npalib.ru/2022/10/18/gost-r-59921-9-2022-id361822/>.

Таблица 2
Псевдонимизация тестового набора данных (фрагмент)

Имя файла	Код ошибки наложения/заключения	Электрографический синдром, вариант ошибки наложения
13974886_Exam_1_0.edf	606_dis_u2	Несинусовый ритм; грудные электроды смещены на 2 межреберья вверх
15298189_Exam_1_0.edf	303_trns_yg	Блокада правой ножки пучка Гиса; перестановка: желтый (L) и зеленый (F) электроды
48746892_Exam_1_0.edf	401_trns_ln	Депрессия сегмента ST; все грудные электроды расположены на прямой линии (C1–C6)
16620912_Exam_1_0.edf	209_trns_56c	Электрокардиографические признаки гипертрофии левого желудочка; перестановка: электроды C5 и C6
57450266_Exam_1_0.edf	304_trns_ry	Блокада правой ножки пучка Гиса; перестановка: красный (R) и желтый (L) электроды
39031859_Exam_1_0.edf	402_trns_crv	Депрессия сегмента ST; электроды C4, C5, C6 расположены вдоль межреберья (не по горизонтальной линии)

Оцифрованные сигналы ЭКГ были сохранены в формате EDF+ (European Data Format) [21]. Регистрация ЭКГ осуществлялась в 12 общепринятых отведениях с частотой дискретизации 500 Гц, продолжительность записи составляла 10 секунд, размах сигнала по входу – 10 мВ. Фильтрация сигнала не проводилась, полоса пропускания – от 0,05 до 150 Гц.

Из полученного набора данных псевдослучайным образом с учетом представленности всех видов дислокаций были сформированы две выборки.

- 1) Обучающая выборка. Выборку составили 262 ЭКГ, зарегистрированные у 27 пациентов, отобранных случайным образом;
- 2) Тестовая выборка. В выборку были включены 59 ЭКГ с разными видами некорректного наложения, зарегистрированные у 6 пациентов, у которых на адекватно зарегистрированной ЭКГ имели место некоторые часто встречаемые ЭКГ-синдромы: несинусовый ритм, нарушения внутрижелудочкового проведения, депрессия сегмента ST, признаки гипертрофии левого желудочка (табл. 2). Каждой ЭКГ тестовой выборки был присвоен 8-разрядный псевдоним, созданный с помощью генератора случайных чисел.

Классификация ошибок наложения электродов, лежащая в основе изучаемой системы искусственного интеллекта

Алгоритм, разработанный ООО «Сибирская телеметрическая компания», реализует 9 последовательных бинарных классификаций: в качестве нулевого класса

выступает стандартное расположение электродов, альтернативой являются 9 вариантов (классов) некорректного наложения электродов, представленные в табл. 3.

Таблица 3
Классы, соответствующие основным вариантам некорректного наложения электродов

Смещение электродов	
Class 1	Грудные электроды – на 2 межреберья выше стандартной схемы
Class 2	Грудные электроды – на 2 межреберья ниже стандартной схемы
Перестановка электродов	
Стандартные отведения	
Class 3	Правая рука (красный) – левая рука (желтый)
Class 4	Левая рука (желтый) – левая нога (зеленый)
Грудные отведения	
Class 5	Все электроды расположены вдоль прямой линии от C1 до C6
Class 6	Перестановка C1 – C2
Class 7	Перестановка C5–C6
Class 8	Электроды C4+C5+C6 расположены слишком близко друг к другу (соприкасаются)
Class 9	Электроды C4, C5, C6 расположены в 5 межреберье (не по горизонтальной линии, а по направлению вверх)

Выбор метода обучения системы

Предварительно была проведена оценка эффективности классификации различных вариантов наложения электродов при применении различных методов машинного обучения. Наиболее эффективным в определении отведения по кардиосигналу оказался алгоритм «Логистическая регрессия» (табл. 4). Этот алгоритм использовался для дальнейшего обучения СИИ.

Таблица 4
Эффективность различных алгоритмов машинного обучения при решении задачи детекции отведения

Алгоритм	Метрика	AUC	Чувствительность	Точность
Сверточная нейронная сеть	0,913	0,73	0,72	0,89
Дерево решений	0,896	0,73	0,71	0,86
GradientBoosting	0,908	0,73	0,72	0,88
Метод главных компонент	0,897	0,73	0,72	0,88
XGBoost	0,621	0,58	0,62	0,65
Наивный Байес	0,996	0,95	0,91	0,95
LightGBM	0,991	1,00	0,89	0,90
Bagging	0,969	0,89	0,87	0,94
CatBoost	0,836	0,82	0,80	0,88
AdaBoost	0,766	0,68	0,73	0,65
Логистическая регрессия	1,000	0,98	1	0,99
Метод опорных векторов	0,770	0,71	0,74	0,70

Анализ диагностической точности системы искусственного интеллекта

Для тестирования СИИ было разработано программное обеспечение на языке Python, реализованное в настольной версии и в виде телемедицинского сервиса (<https://sibtelcom.com/>). В ходе вычислительного эксперимента использовалась вычислительная система Intel Core i9, 256Gb RAM, Nvidia RTX 3080Ti (Intel Corp. и Nvidia, США).

Характеристика специалистов по электрокардиографии, принимавших участие в исследовании

Для сравнения показателей диагностической точности при врачебном и автоматическом анализе была создана репрезентативная группа врачей функциональной диагностики в составе 7 человек, осуществляющих анализ ЭКГ в клиниках разных городов Российской Федерации, с опытом работы от 7 до 25 лет. Врачебный тезаурус совпадал с классификацией ошибок наложения электродов, примененной в изучаемом алгоритме.

Все участники исследования были заранее информированы о наличии среди предложенных для аннотирования нормальных и патологических ЭКГ-записей со стандартным и некорректным расположением электродов, однако соотношение числа ЭКГ с правильным и ошибочным расположением электродов специалистам не сообщалось. Результаты аннотирования класса ошибки учитывались вне зависимости от синдромальных заключений.

Анализ диагностической точности выявления некорректного наложения электродов врачами

Обработка врачебных заключений проводилась путем перевода в бинарную классификацию (1 – констатировано наличие данного класса нарушения, 0 – констатировано отсутствие данного класса нарушения), с последующим усреднением по всем врачам.

Критерии оценки и сравнения диагностической точности

Сопоставление эффективности СИИ и врачебного анализа проводилось по следующим критериям: площадь под ROC-кривой (ROC AUC), чувствительность, специфичность, точность, полнота и F-мера. Порог cut-off определялся по индексу Юдена.

Названные показатели рассчитывались по двум условиям:

- 1) выявление факта ошибочного наложения электродов;
- 2) правильное определение класса ошибки.

Оценка критериев диагностической точности определялась следующим образом:

- менее 0,60 – непригодно и не может быть допущено к клинической валидации;
- 0,61–0,80 – требуется доработка;
- более 0,81 – может быть допущено к клинической валидации [22].

Результаты

По результатам проведенного исследования, при постановке моноклассовой конкретизированной задачи (выявление факта некорректного позиционирования электродов) работа алгоритма характеризуется большей точностью и стабильностью, по сравнению с врачебным анализом (рис. 1 и 2).

В ходе тестирования СИИ были корректно определены пять из девяти классов ошибочного наложения электродов ($ROC\ AUC \geq 0,81$), по оставшимся 4 классам (перестановка C5 и C6; близкое расположение C4, C5 и C6; некорректное направление линии расположения грудных электродов; перестановка электродов на левых руке и ноге) ROC AUC составила от 0,61 до 0,8, что свидетельствует о необходимости доработки и дообучения СИИ (см. рис. 1).

В то же время, специалистами были верно определены лишь три из девяти классов ошибок, а по оставшимся 6 классам (смещение грудных электродов ниже и выше; C4, C5 и C6 расположены близко друг к другу; некорректное направление линии C4–C6; перестановка электродов на левой руке и левой ноге) ROC AUC составила от 0,46 до 0,74 (см. рис. 2).

Значения чувствительности, специфичности и точности более 0,81 были получены при автоматическом анализе только для класса 3 (перестановка электродов на руках, R–L => RL), остальные классы ошибок наложения электродов распознавались алгоритмом с высокой точностью и чувствительностью при специфичности менее 0,81 (табл. 5).

Врачебный анализ обладал столь же высокими показателями чувствительности, специфичности и точности при распознавании перестановки электродов на руках.

При выявлении смещения электродов на 2 ребра выше и ниже стандартного расположения точность и чувствительность алгоритма были ниже, а специфичность выше, по сравнению с показателями врачебного анализа (табл. 5).

Более высокая чувствительность и низкие специфичность и точность (ниже пороговых значений) врачебного анализа также были отмечены при выявлении соприкосновения C4–C6 и некорректного хода линии их расположения.

Параметры F-меры оказались выше порогового значения при автоматическом распознавании всех классов ошибок, однако для смещения грудных электродов на 2 межреберья выше и ниже стандартного положения значение F-меры превышало пороговые значения незначительно (для остальных классов – более 0,95).

Обсуждение

В соответствии с полученными результатами, диагностика перестановки электродов правой и левой рук, приводящая к инверсии ЭКГ в отведениях I и aVR, ожидаемо эффективно осуществлялась как врачами, так и СИИ. Приоритет ИИ в распознавании перестановки электродов левой руки и левой ноги, характеризующейся инверсией отведений III, не затрагивающей aVR, может быть связан с наличием целого ряда состояний, при которых в отведении III может иметь место инверсия,

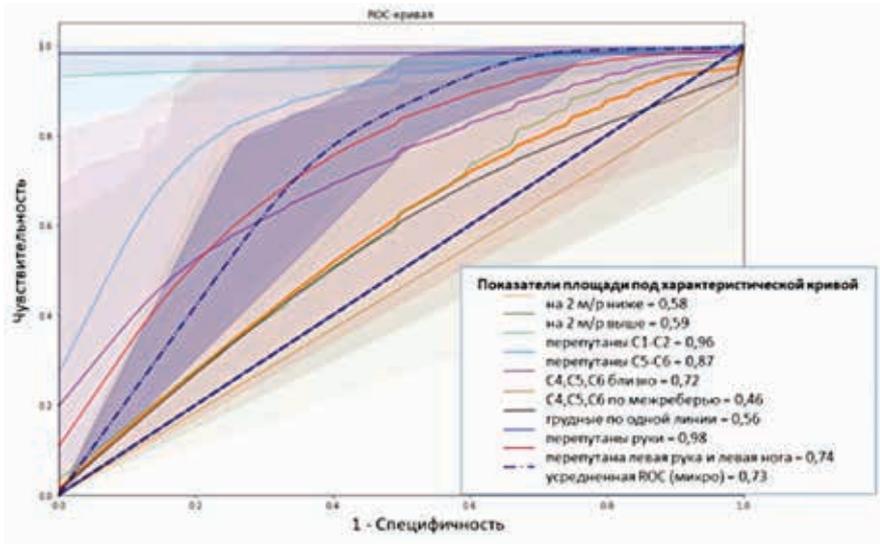


Рисунок 1. Результаты работы алгоритма: ROC-анализ для каждого класса ошибок наложения электродов отдельно и усредненная площадь под ROC-кривой по всем классам. М/р – межреберье

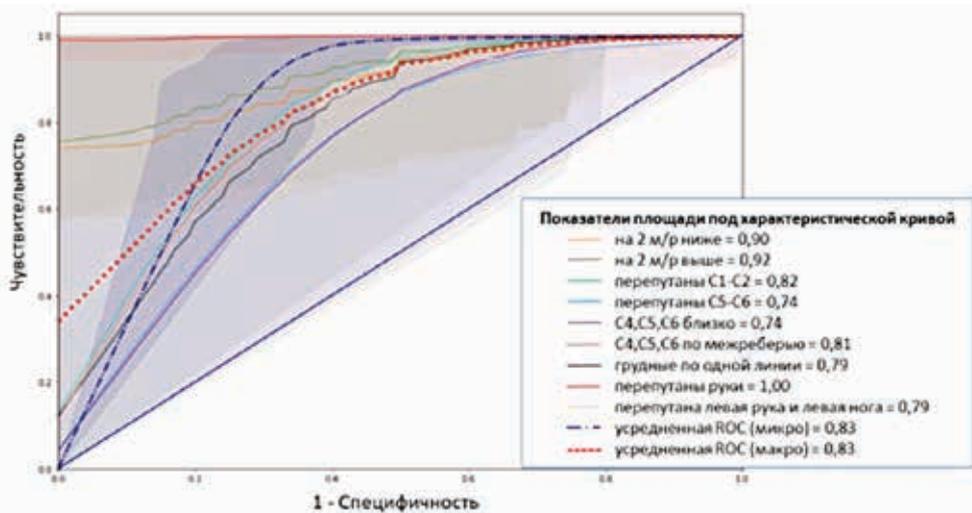


Рисунок 1. Результаты работы врачей: ROC-анализ для каждого класса ошибок наложения электродов отдельно и усредненная площадь под ROC-кривой по всем классам. М/р – межреберье

в том числе давние рубцовые изменения, отклонение электрической оси сердца вправо, задниинный гемиблок и др. Вероятно мы имеем эффект смещения, когда врачи распознают эти изменения как связанные с клиническими или электрофизиологическими особенностями, а СИИ в данной ситуации искала, прежде всего, дислокации электродов.

Изменение положения грудных электродов может приводить к изменению вольтажа R (при смещении вверх и вниз), а также к нарушению линии R (при перестановке) в грудных отведениях, что, как правило, бывает довольно явно для визуального восприятия.

Кроме того, существуют признаки чрезмерно высокого наложения правых грудных электродов [23–25]:

- отрицательный зубец P в V1 (при корректной установке электродов положительный или двухфазный);
- Сочетание морфологии желудочкового комплекса rSr' с отрицательным зубцом P специфично для расположения V1 во втором межреберье;

- наличие отрицательной фазы или улащенного зубца P в V2 соответствует наложению электрода во втором межреберье.

Вместе с тем, названные изменения ЭКГ предполагают дифференциальный диагноз, включающий рубцовые изменения, ишемию, внутрижелудочковые блокады, феномен Бругада, гипертрофию желудочков (что в большинстве случаев бывает отражено во врачебном заключении), а также конституциональные особенности: ротационные изменения вектора QRS, телосложение, наличие молочных желез и особенностей их строения (размер, форма, соотношение жировой и железистой ткани).

Более высокая чувствительность при более низкой специфичности врачебного анализа в выявлении некорректного наложения грудных электродов, по сравнению с автоматическим, вероятно, может быть следствием повышенной настороженности специалистов, заранее информированных о наличии соответствующих ЭКГ среди предложенных для интерпретации.

Таблица 5
 Результаты автоматического и врачебного анализа электрокардиограмм

Критерий	AUC		Точность		Чувствительность		Специфичность		Прецизионность		F-мера	
	СИИ	Врач	СИИ	Врач	СИИ	Врач	СИИ	Врач	СИИ	Врач	СИИ	Врач
Грудные электроды: на 2 межреберья выше стандартной схемы	0,9 (0,78–1,00)	0,58 (0,36–0,81)	0,73 (0,61–0,84)	0,92 (0,84–0,99)	0,7 (0,57–0,82)	1 (1,0–1,0)	1 (1,0–1,0)	0,17 (0,0–0,46)	1 (1,0–1,0)	0,91 (0,84–0,99)	0,82 (0,74–0,9)	0,95 (0,92–0,99)
Грудные электроды: на 2 межреберья ниже стандартной схемы	0,92 (0,81–1,00)	0,59 (0,30–0,82)	0,73 (0,61–0,84)	0,92 (0,84–0,99)	0,7 (0,57–0,82)	0,98 (0,94–1,0)	1 (1,0–1,0)	0,33 (0,0–0,71)	1 (1,0–1,0)	0,93 (0,86–1,0)	0,82 (0,74–0,9)	0,95 (0,91–0,99)
Перепутаны красный (R) и желтый (L) электроды	1 (0,99–1,00)	0,98 (0,94–1,00)	0,98 (0,95–1,0)	0,98 (0,95–1,0)	0,98 (0,94–1,0)	0,98 (0,94–1,0)	1 (1,0–1,0)	1 (1,0–1,0)	1 (1,0–1,0)	1 (1,0–1,0)	0,99 (0,97–1,0)	0,99 (0,97–1,0)
Перепутаны желтый (L) и зеленый (F) электроды	0,79 (0,57–1,00)	0,74 (0,66–0,80)	0,93 (0,86–0,99)	0,73 (0,62–0,84)	0,96 (0,91–1,0)	0,74 (0,62–0,85)	0,67 (0,28–1,0)	0,67 (0,29–1,0)	0,96 (0,91–1,0)	0,95 (0,89–1,0)	0,96 (0,93–1,0)	0,83 (0,75–0,91)
Все грудные электроды расположены на прямой линии от C1–C6	0,79 (0,53–1,00)	0,56 (0,35–0,77)	0,97 (0,91–1,0)	0,75 (0,63–0,86)	1 (1,0–1,0)	0,79 (0,68–0,9)	0,67 (0,28–1,0)	0,33 (0,0–0,71)	0,96 (0,91–1,0)	0,91 (0,83–0,99)	0,98 (0,96–1,0)	0,85 (0,78–0,92)
Перепутаны C1–C2	0,82 (0,60–1,00)	0,96 (0,92–1,00)	0,97 (0,91–1,0)	0,93 (0,87–1,0)	1 (1,0–1,0)	0,92 (0,85–1,0)	0,67 (0,28–1,0)	1 (1,0–1,0)	0,96 (0,91–1,0)	1 (1,0–1,0)	0,98 (0,96–1,0)	0,96 (0,92–1,0)
Перепутаны C5–C6	0,74 (0,52–0,96)	0,87 (0,69–1,00)	0,93 (0,86–0,99)	0,86 (0,78–0,95)	0,98 (0,94–1,0)	0,87 (0,78–0,96)	0,5 (0,09–0,9)	0,83 (0,54–1,0)	0,95 (0,88–1,0)	0,98 (0,94–1,0)	0,96 (0,93–1,0)	0,92 (0,87–0,97)
Электроды C4, C5, C6 расположены очень близко друг к другу (соприкасаются)	0,74 (0,51–0,97)	0,72 (0,50–0,94)	0,95 (0,89–1,0)	0,58 (0,45–0,7)	1 (1,0–1,0)	0,55 (0,41–0,68)	0,5 (0,09–0,9)	0,83 (0,54–1,0)	0,95 (0,88–1,0)	0,97 (0,9–1,0)	0,97 (0,94–1,0)	0,7 (0,6–0,8)
Электроды C4, C5, C6 расположены не вдоль межреберья (линия расположения направлена вверх)	0,81 (0,57–1,00)	0,46 (0,43–0,50)	0,95 (0,89–1,0)	0,1 (0,02–0,18)	0,98 (0,94–1,0)	0 (0,0–0,0)	0,67 (0,28–1,0)	1 (1,0–1,0)	0,96 (0,91–1,0)	–	0,97 (0,94–1,0)	0

Примечание. СИИ — система искусственного интеллекта.

Вместе с тем, в противоположность отведениям V1 и V2, изменения положения электродов V5, V6 достаточно трудно различимы, поэтому для данного класса ошибок регистрации возможности СИИ представляются особенно ценными. Вполне возможно, что сложности распознавания как врачами, так и СИИ, перестановок C5 и C6, близкого расположения C4–C6 и некорректного направления линии расположения грудных электродов связаны с их относительным, по сравнению другими грудными электродами, удалением от точки основания результирующего электрического диполя сердца (если исходить из дипольной концепции формирования поверхностной ЭКГ).

В целом полученные результаты позволяют говорить о сопоставимости диагностической точности исследуемой СИИ в выявлении нарушений расположения электродов электрокардиографа с возможностями среднестатистического врача функциональной диагностики, постоянно занимающегося интерпретацией ЭКГ в рамках ежедневной работы. Возможно, применение новых подходов к разработке алгоритмов автоматизированного анализа позволит повысить их точность.

Большинство существующих алгоритмов для выявления некорректного расположения электродов основаны на определении электрических осей предсердного и желудочкового комплекса, а также на определении интервалов PQ и времени внутреннего отклонения в грудных отведениях. Более прогрессивный подход заключается в применении матриц перерасчета корректно сформированных отведений в отведения, получаемые при ошибочном наложении электродов.

Представляется перспективным проведение дальнейших исследований с применением более обширных баз данных, содержащих информацию о клиническом диагнозе и конституциональных особенностях пациентов, а также с учетом имеющихся ЭКГ-синдромов. Кроме того, целесообразно проведение слепого исследования, с исключением информирования врачей о целенаправленном включении в предлагаемый для аннотирования набор ЭКГ некорректно зарегистрированных записей.

Кроме того, следует отметить, что в данной работе рассматривался случай так называемого единичного нарушения методики регистрации ЭКГ, когда проводилась контролируемая дислокация электродов, но в остальном регистрация ЭКГ соответствовала критериям качества по методическим рекомендациям [7]. На практике нельзя исключить одновременного влияния нескольких факторов, например, различных помех при регистрации ЭКГ, что может осложнить как врачебный анализ, так и работу обученной в условиях единичного нарушения СИИ.

Заключение

В соответствии с полученными результатами, возможности распознавания некорректного наложения электродов, продемонстрированные СИИ, сопоставимы с показателями диагностической точности врачебного анализа. При постановке моноклассовой конкретизированной задачи (выявление факта некорректного позиционирования электродов) работа алгоритма характеризуется большей

точностью и стабильностью. Классы ошибок регистрации, в выявлении которых врачебный и автоматический анализ оказались наиболее эффективными, различались. В целом работа алгоритма характеризуется большей специфичностью и стабильностью. Целесообразно совершенствование алгоритма и проведение дальнейших исследований.

Список литературы / References

- Martinez M., Bouchut S., Thevenon M., et al. Improvement of electrocardiograms implementation quality by emergency nurses with short training // *Ann French Emerg Med.* 2015. Vol. 5, N 2. P. 85–89. doi: 10.1007/s13341-015-0509-8.
- Pearce A. Examining the causes and effects of electrode misplacement during electrocardiography: a literature review // *British Journal of Cardiac Nursing.* 2019. Vol. 14, N 7. P. 1–15. doi: 10.12968/bjca.2019.0010.
- Ramrakha P., Hill J. *Oxford handbook of cardiology.* 2nd edn. Oxford : Oxford University Press, 2012.
- Medani S.A., Hensey M., Caples N., Owens P. Accuracy in precordial ECG lead placement: improving through a peer-led educational intervention // *J Electrocardiol.* 2018. Vol. 51, N 1. P. 50–54. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2017.04.018.
- Kania M., Rix H., Fereniec M. The effect of precordial lead displacement on ECG morphology // *Med Biol Eng Comput.* 2014. Vol. 52, N 2. P. 109–19. doi: 10.1007/s11517-013-1115-9.
- Advanced life support.* 6th edn. London : Resuscitation Council (UK), 2011.
- Дроздов Д.В., Макаров А.М., Баркан В.С., и др. Регистрация электрокардиограммы покоя в 12 общепринятых отведениях взрослым и детям 2023. Методические рекомендации. Российский кардиологический журнал. 2023. Т. 28, № 10. С. 105–130. EDN: JAVUJL doi: 10.15829/1560-4071-2023-5631. Drozdov DV, Makarov LM, Barkan VS, et al. Resting 12-lead electrocardiography for adults and children. 2023 Guidelines. *Russian Journal of Cardiology.* 2023;28(10):105–130. EDN: JAVUJL doi: 10.15829/1560-4071-2023-5631.
- Abdollah H., Milliken J.A. Recognition of electrocardiographic left arm/left leg lead reversal // *Am. J. Cardiol.* 1997. Vol. 80. P. 1247–1249. doi: 10.1016/s0002-9149(97)00656-5.
- Hedén B., Ohlsson M., Holst H. Detection of frequently overlooked electrocardiographic lead reversals using artificial neural networks // *Am. J. Cardiol.* 1996. Vol. 78. P. 600–604. doi: 10.1016/s0002-9149(96)00377-3.
- Hoffman I. A Flatline electrocardiogram in lead II is a marker for right arm/right leg electrode switch // *J. Electrocardiol.* 2007. Vol. 40. P. 226–227. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2006.06.003.
- Han C., Gregg R., Babaeizadeh S. Automatic Detection of ECG Lead-wire Interchange for Conventional and Mason-Likar Lead Systems // *Comput. Cardiol.* 2014. Vol. 41. P. 145–148.
- Krishnan R., Ramesh M. QRS axis based classification of electrode interchange in wearable ECG devices. *EAI Endorsed Trans // Future Intell. Educ. Env.* 2015. doi: 10.4108/eai.14-10-2015.2261647.
- Ho R.T., Mukherji L., Evans G.T. Simple diagnosis of limb-lead reversals by predictable changes in QRS axis // *Pacing Clin. Electrophysiol.* 2006. Vol. 29. P. 272–277. doi: 10.1111/j.1540-8159.2006.00333.x.
- De Bie J., Mortara D.W., Clark T.F. The development and validation of an early warning system to prevent the acquisition of 12-lead resting ECGs with interchanged electrode positions // *J. Electrocardiol.* 2014. Vol. 47. P. 794–797. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2014.08.015
- Ho K.K.L., Ho S.K. Use of the sinus P wave in diagnosing electrocardiographic limb lead misplacement not involving the right leg (ground) lead // *J. Electrocardiol.* 2001. Vol. 34. P. 161–171. doi: 10.1054/jelc.2001.23927
- Kors J.A., van Herpen G. Accurate automatic detection of electrode interchange in the electrocardiogram // *Am. J. Cardiol.* 2001. Vol. 88. P. 396–399. doi: 10.1016/s0002-9149(01)01686-1.
- Han C., Gregg R.E., Field D.Q., Babaeizadeh S. Automatic detection of ECG cable interchange by analyzing both morphology and interlead relations // *J. Electrocardiol.* 2014. Vol. 47. P. 781–787. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2014.08.006.
- Gregg R., Hancock E.W., Babaeizadeh S. Detecting ECG limb lead-wire interchanges involving the right leg lead-wire // *Comput. Cardiol.* 2017. Vol. 44. doi: 10.22489/CinC.2017.014-061
- Xia H., Garcia G.A., Zhao X. Automatic detection of ECG electrode misplacement: A tale of two algorithms // *Physiol. Meas.* 2012. Vol. 33. P. 1549–1561. doi: 10.1088/0967-3334/33/9/1549.
- Dotsinsky I., Daskalov I., Iliev I. Detection of peripheral ECG electrodes misplacement // *Proc. 7th Int. Conf. Electronics ET'98; 1998; Sozopol, Bulgaria.* Режим доступа: <http://ecad.tu-sofia.bg/et/1998/Statii%20ET98-II/Detection%20of%20Peripheral%20ECG%20Electrodes%20Misplacement.pdf>
- Kemp B., Olivan J. European data format 'plus' (EDF+), an EDF alike standard format for the exchange of physiological data // *Clinical Neurophysiology.* 2003. Vol. 114. P. 1755–1761 doi: 10.1016/S1388-2457(03)00123-8.
- Морозов С.П., Владимировский А.В., Кляшторный В.Г., и др. Клинические испытания программного обеспечения на основе интеллектуальных технологий (лучевая диагностика). Москва: Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, 2019. EDN: CBFYFL.
- Morozov SP, Vladimirovskii AV, Klyashpornyi VG, et al. *Clinical trials of software based on intelligent technology (radial diagnostics).* Moscow: Nauchno-prakticheskiy klinicheskiy tsentr diagnostiki i telemeditsinskiy tekhnologii Departamenta zdoravookhraneniya goroda Moskvyy; 2019. (In Russ) EDN: CBFYFL.

23. Rajaganeshan R., Ludlam C.L., Francis D.P. Accuracy in ECG lead placement among technicians, nurses, general physicians and cardiologists // *Int J Clin Pract.* 2008. Vol. 62, N 1. P. 65–70. doi: 10.1111/j.1742-1241.2007.01390.x.
24. Garcia-Niebla J., Rodriguez-Morales M., Valle-Racero J.I., de Luna A.B. Negative P wave in V1 is the key to identifying high placement of V1-V2 electrodes in nonpathological subjects // *Am J Med.* 2012. Vol. 125, N 9. P. e9–e10. doi: 10.1016/j.amjmed.2011.12.024.
25. Rosen A.V., Koppikar S., Shaw C., Baranchuk A. Common ECG Lead Placement Errors. Part II: Precordial Misplacements // *International Journal of Medical Students.* 2014. Vol. 2, N 3. P. 99–103. doi: 10.5195/ijms.2014.96
26. Газашвили Т.М., Дроздов Д.В., Шутов Д.В., Шкода А.С. Создание набора данных с диспозицией и транспозицией наложения электрокардиографических электродов при записи электрокардиограммы в 12 отведениях // *Digital Diagnostics.* 2023. Т. 4, № 2. С. 133–141. doi: 10.17816/DD201870. Gazashvili TM, Drozdov DV, Shutov DV, Shkoda AS. Creation of a training and test dataset with the disposition and transposition of overlaying electrocardiographic electrodes when recording electrocardiograms-12. *Digital Diagnostics.* 2023;4(2):133–141. doi: 10.17816/DD201870.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ООО «Медицинские Компьютерные Системы», лично директору компании Д.А Прилуцкому и всем сотрудникам платформы ECG.ru; Городской клинической больнице № 67 имени Л.А. Ворохобова Департамента здравоохранения города Москвы, главному врачу А.С Шкоде, руководителю центра инструментальной диагностики Т.М Газашвили, медсестрам отделения функциональной диагностики; Ю.С Кирпичеву, младшему научному сотруднику сектора разработки систем внедрения медицинских интеллектуальных технологий Государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы».

Acknowledgments

The authors express their gratitude to Medical Computer Systems LLC, personally to the director of the company D.A. Prilutsky and all employees of the platform ECG.ru; L.A. Vorokhobov City Clinical Hospital No. 67 of the Moscow Department of Health, Chief Physician A.S. Shkoda., head of the Center for Instrumental Diagnostics T.M. Gazashvili, nurses of the Department of Functional Diagnostics; To Yu.S. Kirpichev, junior researcher in the sector of development of systems for the introduction of medical intelligent technologies of the State Budgetary Healthcare Institution of the city of Moscow «Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Department of Health of the City of Moscow».

Статья поступила / Received 01.05.2025
Получена после рецензирования / Revised 10.05.2025
Принята в печать / Accepted 12.05.2025

Информация об авторах

Шутов Дмитрий Валерьевич¹ – д.м.н.
E-mail: ShutovDV@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0003-1836-3689. eLibrary SPIN: 9381-2456

Дроздов Дмитрий Владимирович² – к.м.н.
E-mail: cardioexp@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7374-3604. eLibrary SPIN: 2279-9657

Козловская Ирина Леонидовна³ – к.м.н.
e-mail: ilkozlovskaya@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-7458-4315. eLibrary SPIN: 2913-4765

Попов Алексей Александрович⁴
E-mail: PopovAA8@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0002-4079-2992. eLibrary SPIN: 6769-1821

Берг Юлия Сергеевна⁵
E-mail: chmok2@mail.ru. ORCID: 0009-0001-0111-0362

Иванова Анна Владимировна⁶
E-mail: Anna-kernoseeva@yandex.ru. ORCID: 0009-0000-9986-5802. eLibrary SPIN: 4154-8011

Малько Елена Дмитриевна⁷
E-mail: malko_elenochka@mail.ru. ORCID: 009-0005-9539-43333. eLibrary SPIN: 1134-8900

Пром Альберт Киманович⁸ – к.м.н.
E-mail: albertprom2@gmail.com. ORCID: 0000-00002-7216-8932. eLibrary SPIN: 6235-2460

Леонтьева Анна Алексеевна⁹
E-mail: leontyeva.anny@yandex.ru. ORCID: 0009-0003-4739-2398. eLibrary SPIN: 8195-4826

Унагаева Анна Анатольевна⁹
E-mail: unagaeva@yandex.ru. ORCID: 0009-0001-9141-772X

Чернякова Анна Юрьевна⁹
E-mail: achemyakova@yandex.ru. ORCID: 0009-0000-1406-1881. eLibrary SPIN: 4498-2691

Бобровская Татьяна Михайловна¹
E-mail: BobrovskayaTM@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0002-2746-7554. eLibrary SPIN: 3400-8575

Арзамасов Кирилл Михайлович¹ – к.м.н.
E-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0001-7786-0349. eLibrary SPIN: 3160-8062

Васильев Юрий Александрович¹ – к.м.н.
E-mail: VasilevYA1@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0002-0208-5218. eLibrary SPIN: 4458-5608

Оськин Николай Николаевич³
E-mail: nonik2@mail.ru. ORCID: 0009-0006-1667-364X. eLibrary SPIN: 4837-7996

Богданов Марат Робертович⁴
E-mail: bogdanov_marat@mail.ru. ORCID: 0000-0003-1775-5920. eLibrary SPIN: 6868-5900

Author information

Dmitry V. Shutov¹ – MD, Dr. Sci. (Medicine)
E-mail: ShutovDV@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0003-1836-3689. eLibrary SPIN: 9381-2456

Dmitry V. Drozdov² – MD, Cand. Sci. (Medicine)
E-mail: cardioexp@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7374-3604. eLibrary SPIN: 2279-9657

Irina L. Kozlovskaya³ – MD, Cand. Sci. (Medicine)
e-mail: ilkozlovskaya@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-7458-4315. eLibrary SPIN: 2913-4765

Alexey A. Popov⁴ – MD
E-mail: PopovAA8@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0002-4079-2992. eLibrary SPIN: 6769-1821

Yulia S. Berg⁵ – MD
E-mail: chmok2@mail.ru. ORCID: 0009-0001-0111-0362

Anna V. Ivanova⁶ – MD
E-mail: Anna-kernoseeva@yandex.ru. ORCID: 0009-0000-9986-5802. eLibrary SPIN: 4154-8011

Elena D. Malko⁷ – MD
E-mail: malko_elenochka@mail.ru. ORCID: 009-0005-9539-43333. eLibrary SPIN: 1134-8900

Albert K. Prom⁸ – MD, Cand. Sci. (Medicine)
E-mail: albertprom2@gmail.com. ORCID: 0000-00002-7216-8932. eLibrary SPIN: 6235-2460

Anna A. Leontyeva⁹ – MD
E-mail: leontyeva.anny@yandex.ru. ORCID: 0009-0003-4739-2398. eLibrary SPIN: 8195-4826

Anna A. Unagaeva⁹ – MD
E-mail: unagaeva@yandex.ru. ORCID: 0009-0001-9141-772X

Anna Yu. Cherniakova⁹ – MD
E-mail: achemyakova@yandex.ru. ORCID: 0009-0000-1406-1881. eLibrary SPIN: 4498-2691

Tatiana M. Bobrovskaya¹
E-mail: BobrovskayaTM@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0002-2746-7554. eLibrary SPIN: 3400-8575

Kirill M. Arzamasov¹ – MD, Cand. Sci. (Medicine)
E-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0001-7786-0349. eLibrary SPIN: 3160-8062

Yurii A. Vasilev¹ – MD, Cand. Sci. (Medicine)
E-mail: VasilevYA1@zdrav.mos.ru. ORCID: 0000-0002-0208-5218. eLibrary SPIN: 4458-5608

Nikolai N. Oskin³
E-mail: nonik2@mail.ru. ORCID: 0009-0006-1667-364X. eLibrary SPIN: 4837-7996

Marat R. Bogdanov⁴
E-mail: bogdanov_marat@mail.ru. ORCID: 0000-0003-1775-5920. eLibrary SPIN: 6868-5900

¹ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация

² Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии имени академика Е.И. Чазова, Москва, Российская Федерация

³ ООО «Сибирская телеметрическая компания», Уфа, Российская Федерация

⁴ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

⁵ Красногорская городская больница, поликлиника № 4, Красногорск, Российская Федерация

⁶ Республиканский центр общественного здоровья и медицинской профилактики, лечебной физкультуры и спортивной медицины, Чебоксары, Российская Федерация

⁷ Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Российская Федерация

⁸ Городская поликлиника № 4, Иркутск, Российская Федерация

⁹ ООО «МРТ Центр Рыбачков», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Контактная информация:

Шутов Дмитрий Валерьевич. E-mail: ShutovDV@zdrav.mos.ru

Contact information

Dmitry V. Shutov. E-mail: ShutovDV@zdrav.mos.ru

Для цитирования: Шутов Д.В., Дроздов Д.В., Козловская И.Л., Оськин Н.Н., Богданов М.Р., Попов А.А., Берг Ю.С., Иванова А.В., Леонтьева А.А., Малько Е.Д., Пром А.К., Унагаева А.А., Чернякова А.Ю., Бобровская Т.М., Арзамасов К.М., Васильев Ю.А. Возможности системы искусственного интеллекта в распознавании смещения и перестановки электрокардиографических электродов в сравнении с экспертным врачебным анализом. Медицинский алфавит. 2025;(12):54–61. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-12-54-61>

For citation: Dmitry V. Shutov, Dmitry V. Drozdov, Irina L. Kozlovskaya, Nikolai N. Oskin, Marat R. Bogdanov, Alexey A. Popov, Yulia S. Berg, Anna V. Ivanova, Anna A. Leontyeva, Elena D. Malko, Albert K. Prom, Anna A. Unagaeva, Anna Yu. Cherniakova, Tatiana M. Bobrovskaya, Kirill M. Arzamasov, Yurii A. Vasilev. The recognition accuracy of electrocardiographic electrodes misplacement by an artificial intelligence system compared to medical experts. Medical alphabet. 2025;(12):54–61. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-12-54-61>