

Электрокардиография при легочной гипертензии: поиск новых диагностических возможностей (обзор литературы)

А.В. Соболев, Е.В. Блинова, Т.А. Сахнова, Д.В. Дроздов

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии имени академика Е.И. Чазова» МЗ РФ

РЕЗЮМЕ

В обзоре освещаются современные клинические рекомендации относительно использования электрокардиографии (ЭКГ) при обследовании больных с легочной гипертензией (ЛГ), приводятся данные о корреляции параметров ЭКГ с показателями гемодинамики при ЛГ, обсуждаются возможности использования ЭКГ при скрининге ЛГ, в том числе, включение показателей ЭКГ в клинические шкалы. Особое внимание уделяется данным о связи изменений ЭКГ с прогнозом больных ЛГ и применению ЭКГ для оценки эффективности лечения ЛГ, в частности, баллонной ангиопластики легочной артерии при хронической тромбоэмболической легочной гипертензии. Специальные разделы посвящены таким путям улучшения электрокардиографической диагностики ЛГ, как использование трехмерных векторкардиографических параметров и обработка ЭКГ с привлечением методов глубокого машинного обучения. Описываются «мягкие» функциональные пробы, которые потенциально могут иметь полезную информацию в диагностике ЛГ (проба с водной нагрузкой, пассивный подъем ног, глубокий вдох).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: легочная гипертензия, электрокардиограмма, векторкардиограмма, функциональные пробы, глубокое машинное обучение, оценка эффективности лечения, прогноз.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Electrocardiography in pulmonary hypertension: search for new diagnostic possibilities (literature review)

A.V. Sobolev, E.V. Blinova, T.A. Sakhnova, D.V. Drozdov

Federal State Budgetary Institution «National Medical Research Centre of Cardiology named after academician E.I. Chazov» of the Ministry of Health of the Russian Federation

SUMMARY

The review covers current clinical guidelines for the use of electrocardiography (ECG) in examining patients with pulmonary hypertension (PH), provides data on the correlation of ECG parameters with hemodynamic parameters in PH, discusses the possibilities of using ECG in PH screening, including the inclusion of ECG parameters in clinical scales. Particular attention is paid to data on the relationship between ECG changes and the prognosis of patients with PH and the use of ECG to assess the effectiveness of PH treatment, in particular, pulmonary artery balloon angioplasty in chronic thromboembolic pulmonary hypertension. Special sections are devoted to such ways of improving electrocardiographic diagnostics of PH as the use of three-dimensional vectorcardiographic parameters and ECG processing using deep machine learning methods. The paper describes «soft» functional tests that can potentially provide useful information in the diagnosis of PH (fluid challenge, passive leg raise, deep inhalation).

KEYWORDS: pulmonary hypertension, electrocardiogram, vectorcardiogram, functional tests, deep machine learning, evaluation of treatment effectiveness, prognosis.

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

В 2024 году одобрена Минздравом обновленная версия клинических рекомендаций «Легочная гипертензия, в том числе хроническая тромбоэмболическая легочная гипертензия» [1].

В соответствии с этим документом, легочная гипертензия (ЛГ) может представлять собой как синдром, связанный с сердечно-сосудистыми или легочными заболеваниями, так и самостоятельное заболевание.

Клиническая классификация включает пять групп ЛГ:

- Легочная артериальная гипертензия (ЛАГ, группа I).
- ЛГ, связанная с заболеваниями левых отделов сердца (группа II).
- ЛГ, связанная с патологией легких и/или гипоксией (группа III).

- ЛГ, связанная с обструкцией легочной артерии (группа IV).
- ЛГ неизвестного и/или смешанного генеза (группа V).

К группе I относятся идиопатическая ЛГ (ИЛГ); наследственная ЛАГ; ЛАГ, индуцированная лекарственными препаратами и токсинами; ЛАГ, ассоциированная с врожденными пороками сердца (ВПС), системными заболеваниями соединительной ткани, ВИЧ-инфекцией, портальной гипертензией, и ряд других редких заболеваний.

Наиболее распространенной является ЛГ при заболеваниях левых отделов сердца. Она развивается примерно у половины больных с аортальным стенозом и пациентов с хронической сердечной недостаточностью с сохраненной фракцией выброса и составляет до 80% всех форм ЛГ.

ЛГ при заболеваниях легких наблюдается примерно у 1–5% больных с хронической обструктивной болезнью легких, а при идиопатическом легочном фиброзе может достигать 60%.

Одним из основных представителей группы IV является хроническая тромбоэмболическая ЛГ (ХТЭЛГ).

С точки зрения гемодинамики ЛГ подразделяют на прекапиллярную, посткапиллярную и комбинированную пост-/прекапиллярную. Критерием любой ЛГ считается среднее давление в легочной артерии (срДЛА) > 20 мм рт. ст. Прекапиллярная ЛГ характеризуется давлением заклинивания легочной артерии (ДЗЛА) ≤ 15 мм рт. ст. и легочным сосудистым сопротивлением (ЛСС) > 2 единиц Вуда; посткапиллярная ЛГ – ДЗЛА > 15 мм рт. ст. и ЛСС ≤ 2 единиц Вуда; комбинированная пост-/прекапиллярная ЛГ – ДЗЛА > 15 мм рт. ст. и ЛСС > 2 единиц Вуда.

К прекапиллярной ЛГ относят группы I, III и IV; к посткапиллярной ЛГ – группу II. В группе V может наблюдаться как пре-, так и посткапиллярная ЛГ.

Согласно рекомендациям [1, 2], задачами комплексного обследования у больных ЛГ являются установление диагноза; определение клинической группы и гемодинамического типа ЛГ; оценка функционального статуса пациента, а также стратификация риска смерти.

«Золотым стандартом» в диагностике ЛГ является чрезвенная катетеризация сердца (ЧВКС). В связи со сложностью выполнения и риском осложнений проведение ЧВКС рекомендуется осуществлять в экспертных центрах пациентам с подозрением на ЛАГ или ХТЭЛГ для подтверждения диагноза, определения тактики и оценки эффективности лечения. У пациентов групп II и III проведение ЧВКС рекомендуется лишь перед трансплантацией сердца и/или легких, а также может быть рассмотрено при неэффективности терапии для дифференциальной диагностики.

Регистрация ЭКГ предусмотрена у всех пациентов с ЛГ как при первичном обследовании, так и в процессе динамического наблюдения. ЭКГ признаки гипертрофии правого желудочка (ГПЖ) имеют не очень высокую чувствительность и специфичность, однако сочетание неизменной ЭКГ с нормальным уровнем биомаркеров свидетельствует о низкой вероятности ЛГ. Признаками неблагоприятного прогноза могут быть расширение комплекса QRS, удлинение QTc, трепетание или фибрилляция предсердий.

При сопоставлении ЭКГ с данными МРТ сердца у 4062 лиц без сердечно-сосудистых заболеваний ЭКГ критерии ГПЖ имели относительно высокую специфичность, но низкую чувствительность и положительную прогностическую значимость (максимум 12%). Комбинации различных ЭКГ критериев не увеличивали информативность [3].

Корреляции параметров ЭКГ с показателями гемодинамики при ЛГ

В последние годы предпринимались попытки сопоставить изменения ЭКГ не с массой миокарда правого желудочка (ПЖ), а с показателями гемодинамики и клиническими особенностями у больных ЛГ.

У 94 пациентов I, III и IV групп ЛГ депрессия сегмента PR в отведении II и площадь положительной фазы зубца PV1 имели значимую связь с давлением в ПП. Чувствительность, специфичность и отрицательная прогностическая ценность депрессии сегмента PR для выявления пациентов с давлением в ПП > 14 мм рт. ст. составили 80, 84 и 94%, площади положительной фазы зубца PV1 – 55, 89 и 88% [4].

У 103 пациентов с ЛАГ уровень дисперсии зубца P положительно коррелировал с конечным диастолическим диаметром ПЖ, конечным систолическим диаметром ПП, срДЛА, ЛСС и отрицательно – с TAPSE (TAPSE, tricuspid annular plane systolic excursion, систолическая экскурсия фиброзного кольца трикуспидального клапана – один из показателей систолической функции правого желудочка, в норме больше 17 мм), а также значительно различался в группах низкого, среднего и высокого риска [5]. У 26 пациентов с ЛАГ амплитуда зубца PII положительно коррелировала с наклоном минутной вентиляции к продукции углекислого газа (наклон VE/VCO₂) и давлением в ПП; индекс Соколова – Лайона ПЖ (RV1 + max SV5 или V6) – с градиентом давления трикуспидальной регургитации, толщиной свободной стенки ПЖ, наклоном VE/VCO₂ и срДЛА; амплитуда RaVR – с градиентом давления трикуспидальной регургитации, срДЛА и ЛСС. Длительность QRS положительно коррелировала с расчетным давлением в ПП, диаметром нижней полой вены и площадью ПП и отрицательно – с параметрами толерантности к физической нагрузке [6].

У пациентов с впервые диагностированной ХТЭЛГ проксимальную локализацию поражения позволяли предсказывать RV1 > 6 мм; SV6 > 3 мм; SI > RI; RV1/SV1 > 1,0; время внутреннего отклонения в V1 > 35 мс (при QRS < 120 мс); RV1/SV1 > RV3(V4)/SV3(V4); RaVR > 4 мм и PII > 2,5 мм. Амплитуды RV1, SV6 и PII имели умеренные положительные корреляционные связи с ЛСС [7].

В группе из 562 пациентов, подвергавшихся ЧВКС, амплитуда зубца PII, RaVR, соотношение R/S в V1 и V2, положение электрической оси сердца коррелировали с систолическим давлением в легочной артерии (сДЛА), срДЛА и ЛСС. Амплитуда зубца PII > 0,16 мВ, RaVR > 0,5 мВ, ось QRS > 100° и R/S в V1 > 0,9 позволяли выявлять как срДЛА > 20 мм рт. ст., так и ЛСС > 2 единиц Вуда [8].

Эхокардиографическая (ЭхоКГ) оценка скорости трикуспидальной регургитации является ключевым показателем при скрининге ЛГ. На основании ее значения и дополнительных признаков перегрузки ПЖ судят о низкой, средней или высокой вероятности ЛГ для решения о дальнейшей инвазивной оценке. Тяжелая трикуспидальная регургитация может приводить к недооценке сДЛА. При анализе 83 пациентов с тяжелой трикуспидальной регургитацией, которым проводилась ЧВКС, оказалось, что наличие ЛГ позволяли предсказать R/SV1 > 1,5 (чувствительность 57%, специфичность 85%), max RV1 или V2 + max SI или aVL – SV1 > 3 мм (чувствительность 91%, специфичность 60%) и SI/RI > 0,71 (чувствительность 82%, специфичность 71%) [9].

Длительность интервала от пика до конца волны Т (T-peak-T-end) у 38 пациентов, которым проводили ЧВКС в связи с подозрением на ЛГ, значимо коррелировала со срдЛА, ЛСС и сердечным индексом. Более продолжительный интервал T-peak-T-end был связан с более высоким уровнем NTpro-BNP, меньшей дистанцией в тесте 6-минутной ходьбы и меньшей TAPSE [10].

При сопоставлении конфигурации комплекса QRS в отведении V1 с данными ЭхоКГ у 80 больных ИЛГ и ХТЭЛГ наличие конфигурации qR в отведении V1 с чувствительностью 46% – 89% и специфичностью 89–95% выявляло больных с прогностически неблагоприятными изменениями ЭхоКГ: перикардальным выпотом, площадью ПП > 26 см², TAPSE < 1,5 см [11].

Включение показателей ЭКГ в клинические шкалы

В ретроспективном исследовании 341 пациента с острой тромбоэмболией легочной артерии (ТЭЛА) модель для количественной оценки тромботической нагрузки, включавшая ряд клинических показателей и изменения ЭКГ (блокаду правой ножки пучка Гиса, отклонение электрической оси сердца вправо, инвертированный зубец Т, конфигурацию S1Q3T3) продемонстрировала умеренную дискриминацию как в обучающей, так и в тестовой выборке (с-индекс 0,66, 95% доверительный интервал 0,56–0,76). Модель для прогнозирования вероятности обструкции ствола имела схожие показатели [12].

Наличие посткапиллярной ЛГ можно было с чувствительностью 22% и специфичностью 100% предсказать на основе шкалы, включавшей индекс массы тела ≥ 30 , сахарный диабет, мерцательную аритмию, дислипидемию, наличие в анамнезе операций на клапанах сердца, сумму SV1 и RV6 на ЭКГ и дилатацию левого предсердия [13].

В международном исследовании взрослых пациентов с системной склеродермией (ССД) с помощью многофакторного анализа были выбраны и включены в двухэтапный алгоритм лучшие переменные для выявления ЛАГ. Первый шаг алгоритма, включавший, в том числе, отклонение электрической оси сердца вправо, служил для направления на ЭхоКГ, две ЭхоКГ переменные – направление на ЧВКС. Алгоритм DETECT рекомендовал ЧВКС у 62% пациентов и пропустил 4% пациентов с ЛАГ; при стандартном подходе в этой группе частота направления на ЧВКС составила 40%, диагноз ЛАГ был пропущен в 29% случаев [14].

Использование ЭКГ при скрининге ЛГ

В современных рекомендациях ЭКГ упоминается как один из методов скрининга у носителей мутаций, вызывающих ЛАГ, а также у пациентов после коррекции ВПС. Как упоминалось, отклонение электрической оси сердца вправо входит в алгоритм DETECT, рекомендуемый для больных ССД. При других заболеваниях убедительных данных о возможности использования ЭКГ для скрининга ЛГ пока не получено [15, 16].

Связь изменений ЭКГ с прогнозом больных ЛГ

ЭКГ пока не относят к методам стратификации риска больных ЛГ, однако данные о связи изменений ЭКГ с неблагоприятным прогнозом у больных ЛГ продолжают накапливаться.

У 141 пациента с ЛАГ при заболевании соединительной ткани фрагментация QRS и изменения ST-T в нижних отведениях были достоверно связаны со смертностью от всех причин [17].

У 26 пациентов с ЛАГ индекс Соколова-Лайона ПЖ и продолжительность QRS оказались значимыми предикторами промежуточного/высокого риска смертности в течение 1 года [6].

У 140 пациентов с ЛАГ или ХТЭЛГ выживаемость без трансплантации была хуже при аномальной ЭКГ. Со смертностью от всех причин или трансплантацией легких были связаны длительность QRS и амплитуда зубца SV5 [18].

У 77 пациентов с ЛАГ и 56 пациентов с неоперабельной ХТЭЛГ наличие инверсии зубца Т в последовательных отведениях от V1 до V5 было предиктором смертности. При уменьшении диапазона инверсии зубца Т как минимум на одно отведение после лечения наблюдалось уменьшение конечного диастолического объема ПЖ и его соотношения с объемом левого желудочка [19].

У 169 пациентов с ЛГ, ассоциированной с ССД, при отклонении электрической оси сердца влево наблюдалось преимущественно левостороннее, а вправо – правостороннее поражение сердца, большее срдЛА и ЛСС. Оба типа изменений были связаны с повышенным риском смертности от всех причин [20].

При анализе данных 18 рандомизированных клинических испытаний терапии ЛАГ (4439 пациентов) наличие на ЭКГ ГПЖ, отклонения электрической оси вправо, увеличения ПП или блокады правой ножки пучка Гиса было связано с повышенным риском клинического ухудшения, но в то же время, эти пациенты имели больший эффект лечения [21].

Применение ЭКГ для оценки эффективности лечения ЛГ

В последние годы исследователей интересует возможность использования ЭКГ для оценки эффективности баллонной ангиопластики легочной артерии (БАП) у пациентов с ХТЭЛГ.

У 15 пациентов с ХТЭЛГ через 1 год после БАП предикторами улучшения срдЛА были амплитуды зубцов SV1 и RV5. Нормализация суммы RV1 и SV5 была предиктором более хорошего функционального статуса [22].

У 29 пациентов с ХТЭЛГ с улучшением гемодинамики после БАП и 7 пациентов с ЛАГ, у которых гемодинамическое улучшение, соответствующее критериям ответа, наблюдалось после однократной ингаляции илоprostа, несмотря на схожее улучшение гемодинамики, только в группе ХТЭЛГ наблюдались значимые изменения параметров ЭКГ: ось зубца Т, ось QRS, амплитуда зубцов PII, RV1, SV5, RV5, SV6, RV6, RaVR, соотношение R/S в V5. У пациентов с ЛАГ значимые различия были обнаружены только для зубца PII и оси QRS [23].

В когорте из 17 пациентов с ХТЭЛГ до и после БАП статистически значимая корреляция была обнаружена между снижением срДЛА и уменьшением глубины зубцов SI, SV5, SV6 и амплитудой зубцов RV5 и RV6 [24].

У 32 пациентов с ХТЭЛГ через 6 месяцев после БАП величина изменения амплитуды зубца TV2 достоверно коррелировала с величиной изменения систолического давления в ПЖ, срДЛА, ЛСС и системного сосудистого сопротивления [25].

При ретроспективном анализе 39 пациентов с ХТЭЛГ, у которых было по крайней мере два сеанса БАП, критерии Льюиса ($R I + S III - (S I + R III)$) и Батлера ($\max RV I$ или $V2 + \max S I$ или $aVL - SV I$) коррелировали с показателями гемодинамики и были предикторами срДЛА ≥ 35 мм рт. ст. [26].

При анализе ЭКГ и ЧВКС до и через 6 месяцев после БАП у 140 пациентов с ХТЭЛГ критерий Батлера после вмешательства стал реже превышать нормальные значения и коррелировал с срДЛА и ЛСС. Превышение порогового значения этого показателя до и после терапии было связано с более тяжелой ХТЭЛГ и повышенным риском смерти [27].

На группе 94 пациентов с ХТЭЛГ была разработана и проверена шкала ЭКГ для контроля эффективности БАП, включающая четыре показателя: $R V I + \max SV5$ или $V6 > 10,5$ мм, ось QRS $> 110^\circ$, $RV I > SV I$, конфигурация SIQIII. Балл по шкале ЭКГ = 0 хорошо выявлял пациентов со срДЛА < 25 мм рт. ст. В группе проверки значения чувствительности, специфичности, положительной и отрицательной предсказательной ценности составили 86, 77, 73 и 89% соответственно [28].

Та же шкала была изучена при ретроспективном анализе 73 пациентов, перенесших легочную энтертерэктомии. Через 13 месяцев балл по шкале ЭКГ = 0 являлся хорошим предиктором срДЛА ≤ 20 мм рт. ст.: чувствительность 70%; специфичность 71%; положительная прогностическая ценность 89%; отрицательная прогностическая ценность 41% [29].

Применению ЭКГ при решении вопросов, связанных с лечением других заболеваний, сопровождающихся ЛГ, в последние годы посвящены лишь единичные исследования.

У пациентов с острой ТЭЛА фронтальный угол QRS-T, который был значимо выше при наличии перегрузки давлением ПЖ, значительно изменялся после тромболитической терапии [30].

У 501 участника исследования «Бета-блокаторы для профилактики острых обострений ХОБЛ (BLOCK-COPD)» не было выявлено связи между P-pulmonale и риском обострений ХОБЛ, однако у лиц с P-pulmonale применение метопролола было связано с повышенным риском обострений [31].

Векторкардиографические показатели в диагностике ЛГ

Одним из возможных путей повышения информативности ЭКГ при обследовании пациентов с ЛГ может быть использование трехмерных векторкардиографических (ВКГ) параметров.

При оценке диагностической ценности ВКГ параметров системы отведений Франка при ХОБЛ азимут вектора QRS уменьшился с -24° в группе без ЛГ до -62° при ЛГ без ГПЖ и до -140° при ЛГ с ГПЖ. Аналогичное значимое снижение наблюдалось для азимута вектора желудочкового градиента. Пространственный угол QRS-T увеличился с 69° в группе без ЛГ до 115° при ЛГ без ГПЖ. Наблюдалась значимая корреляция между СДЛА и углом QRS-T и между СДЛА и азимутом вектора желудочкового градиента [32].

У 132 пациентов с подозрением на ЛГ было проведено сравнение информативности ВКГ, полученной с помощью обратной матрицы Дауэра и матрицы Корса, для выявления СДЛА ≥ 50 мм рт. ст. Несмотря на то, что большинство параметров ВКГ значительно различались между двумя матрицами, ROC-анализ не продемонстрировал разницы между обратной матрицей Дауэра ($AUC = 0,80$) и матрицей Корса ($AUC = 0,80$). ВКГ, полученные с помощью обеих матриц, предоставили значимую диагностическую информацию о наличии ЛГ [33].

У 196 пациентов с ограниченной и 77 пациентов с диффузной формой ССД была оценена связь желудочкового градиента с наличием ЛГ и выживаемостью. У пациентов с ограниченной ССД изменения желудочкового градиента имели более высокую диагностическую ценность, чем отклонение электрической оси сердца вправо, однако таких различий не наблюдалось у пациентов с диффузной формой ССД. Измененный желудочковый градиент был связан со снижением выживаемости у всех пациентов ССД с ЛГ [34].

При ретроспективном анализе серии ЭКГ и ЭхоКГ у 24 пациентов с ССД, у пациентов с ЛГ модифицированный желудочковый градиент был выше, чем у пациентов без ЛГ, и увеличивался с течением времени. Желудочковый градиент был более чувствителен для выявления прогрессирования заболевания на ранних стадиях по сравнению с СДЛА [35].

У 63 пациентов с подозрением на ЛГ как показатель Батлера, так и желудочковый градиент коррелировали со срДЛА. Комбинация показателя Батлера и желудочкового градиента при обнаружении ЛГ имела площадь под ROC-кривой 0,79 [36].

При наблюдении в течение 3 лет 265 пациентов, находившихся на гемодиализе, пациенты с патологическими значениями желудочкового градиента с большей вероятностью имели высокий или средний риск развития ЛГ. При многофакторном анализе желудочковый градиент оставался независимым и сильным предиктором общей и сердечно-сосудистой смертности [37].

При ретроспективном анализе пациентов с вторичным дефектом межпредсердной перегородки, которым проводилась ЧВКС, пространственный угол QRS-T значимо различался у пациентов с ЛГ и без ЛГ. При пороговом значении 124° его положительная и отрицательная прогностическая ценность для выявления ЛГ составила 36% и 96% соответственно [38].

Попытки использовать желудочковый градиент для диагностики острой ТЭЛА и ХТЭЛГ пока не имели особого успеха [39, 40].

Обработка ЭКГ с использованием методов искусственного интеллекта в диагностике ЛГ

В последние годы в нескольких крупных клиниках были предприняты попытки разработки алгоритмов раннего обнаружения ЛГ на основе данных ЭКГ с привлечением методов искусственного интеллекта.

В клинике Майо был создан алгоритм обнаружения ЛГ, представляющий собой сверточную нейронную сеть, разработанную с использованием ЭКГ пациентов с «вероятной ЛГ» или «маловероятной ЛГ» по данным ЧВКС или ЭхоКГ. В общей сложности 39823 пациента с вероятной ЛГ и 219404 пациента с маловероятной ЛГ были случайным образом разделены на обучающую (48%), проверочную (12%) и тестовую (40%) выборки. Работа алгоритма проверялась также на ЭКГ, снятых за 6–18 месяцев и за 5 лет до диагностики ЛГ. Тестирование алгоритма дало площадь под ROC-кривой 0,92 и 0,88 в тестовых выборках. На ЭКГ, снятых за 5 лет до постановки диагноза, площадь под ROC-кривой составляла 0,79–0,73 [41].

С использованием 36186 ЭКГ из базы данных Калифорнийского университета в Сан-Франциско ЭКГ сегментировали на стандартные зубцы и интервалы, при помощи комбинации сверточных нейронных сетей и скрытых марковских моделей. Затем строили профиль ЭКГ пациента (вектор признаков из 725 элементов) и использовали его в моделях машинного обучения. Модель, обученная с использованием профилей ЭКГ пациента, имела площадь под ROC-кривой 0,94 для обнаружения ЛАГ [42].

В Калифорнийском университете в Сан-Франциско взрослые с ЧВКС или ЭхоКГ в течение 90 дней после ЭКГ были ретроспективно идентифицированы как имеющие (5016 пациентов) или не имеющие (19 454 пациента) ЛГ. Пациенты были разделены на обучающую, проверочную и тестовую выборки в соотношении 7:1:2. Модель, представляющая собой глубокую сверточную нейронную сеть, в тестовой выборке достигла площади под ROC-кривой, чувствительности и специфичности соответственно 0,89, 0,79 и 0,84 для обнаружения ЛГ; 0,91, 0,83 и 0,84 для обнаружения прекапиллярной ЛГ; 0,88, 0,81 и 0,81 для обнаружения ЛАГ и 0,80, 0,73 и 0,76 для обнаружения ЛГ группы III. Обученную модель дополнительно применили к ЭКГ участников тестовой выборки, которые были сняты за 2 года до постановки диагноза ЛГ; площадь под ROC-кривой составила не менее 0,79 [43].

В Южной Корее алгоритм для прогнозирования ЛГ с использованием ЭКГ был разработан с использованием данных пациентов из двух больниц: в одной были получены наборы данных для обучения (56 670 ЭКГ от 24 202 пациентов) и внутренней проверки (3174 ЭКГ от 3174 пациентов), в другой – для внешней проверки (10865 ЭКГ от 10 865 пациентов). Алгоритм на основе ансамблевой нейронной сети был разработан с использованием ЭКГ и демографической информации. Во время внутренней и внешней проверки алгоритма для обнаружения ЛГ площадь под ROC-кривой составила 0,86 и 0,90 соответственно. Пациенты без ЛГ, которых алгоритм определил, как имеющих высокий риск ЛГ, в дальнейшем имели более

высокий шанс развития ЛГ, чем те, кто был в группе низкого риска. Карта чувствительности показала, что алгоритм фокусировался на зубцах S, R и T [44].

В Тайбэе из госпитальной базы данных ЭКГ были извлечены первые пары ЭКГ и ЭхоКГ, снятых с интервалом в 2 недели у 41 097 пациентов, для разработки модели глубокого обучения с целью обнаружения повышенного СДЛА (> 50 мм рт. ст.). Модель была проверена на независимых наборах данных, включая внешнюю когорту пациентов из Японии. Площадь под ROC-кривой модели составила 0,88 (чувствительность 81%; специфичность 80%). При 6-летнем наблюдении пациентов, наличие повышения СДЛА, предсказанное моделью, было независимо связано с более высокой сердечно-сосудистой смертностью, повышая ее в 3,69 раза [45].

В Тайбэе также была разработана модель глубокого обучения, использующая парные ЭКГ и рентгенограммы грудной клетки для обнаружения повышения СДЛА. Была оценена способность модели предсказывать будущие случаи сердечно-сосудистой смертности. Во внешней выборке площади под ROC-кривой для обнаружения повышения СДЛА составили 0,83 по ЭКГ, 0,86 по рентгенографии грудной клетки и 0,87 по их комбинации; отрицательная прогностическая ценность комбинации ЭКГ и рентгенографии грудной клетки – 98%. У пациентов с повышением СДЛА, обнаруженным моделью с использованием комбинации ЭКГ и рентгенографии, риск возникновения сердечно-сосудистой смертности был в 6 раз выше [46].

«Мягкие» функциональные пробы в диагностике ЛГ

При подозрении на наличие посткапиллярного компонента у больных с прекапиллярной ЛГ современные рекомендации предусматривают возможность проведения пробы с водной нагрузкой при ЧВКС. Проба представляет собой введение 500 мл 0,9% раствора хлорида натрия за 5–10 минут с последующим повторным измерением ДЗЛА. Критерием положительной пробы считается повышение ДЗЛА более 18 мм рт. ст. Рутинное применение пробы пока не рекомендуется в связи с отсутствием убедительных данных о ее безопасности и диагностической ценности.

Чтобы определить, как проба с введением физиологического раствора влияет на диагностику и лечение, 7 специалистам по ЛГ были представлены клинические и гемодинамические данные 48 пациентов с ДЗЛА ≤15 мм рт. ст. исходно и после введения 500 мл физиологического раствора и предложено классифицировать пациентов и изложить планы лечения. С учетом пробы 20% случаев были переклассифицированы как имеющие компонент ЛГ группы II. Проба повысила уверенность в классификации ЛГ и изменила план лечения в 6,5% случаев [47].

У 174 пациентов при ЧВКС в состоянии покоя и после быстрой внутривенной инфузии 500 мл физиологического раствора изменение ДЗЛА было обратно пропорционально исходному ДЗЛА. ДЗЛА после введения жидкости превысило 18 мм рт. ст. у 81% пациентов с исходным ДЗЛА 13–15 мм рт. ст., что поставило под сомнение полезность пробы у этих пациентов [48].

Предпринимались также попытки использовать пробу с водной нагрузкой для выявления скрытой дисфункции ПЖ и определения прогноза у больных ЛГ.

У 32 пациентов с ЛГ и 4 контрольных пациентов при ЧВКС петли давления-объема регистрировались во время острой объемной нагрузки (200 мл физиологического раствора за 20 с). При острой объемной нагрузке сопряжение ПЖ-легочная артерия значительно снизилось у пациентов с ЛГ, но оставалось стабильным в контрольной группе. У пациентов с ЛГ с меньшим процентом снижения сопряжения ПЖ-легочной артерии прогноз был значительно лучше [49].

При оценке прогностической значимости изменений легочной гемодинамики, вызванных пробой с быстрой инфузией физиологического раствора, у 118 пациентов с ЛАГ при многофакторном регрессионном анализе единственным независимым предиктором исхода был сердечный индекс после инфузионной нагрузки $< 2,8$ л/мин/м² [50].

Некоторые авторы относят к методам, потенциально способным повысить диагностическую эффективность ЧВКС при ЛГ, пробу с пассивным поднятием ног. Этот простой маневр увеличивает сердечную преднагрузку путем перемещения около 300 мл крови из венозной системы нижних конечностей к сердцу. Предполагается, что маневр может использоваться у больных с противопоказаниями к введению жидкости. В то же время проба может быть неэффективной при использовании компрессионных чулок, наличии внутрибрюшной гипертензии или тромбоза глубоких вен нижних конечностей. Диагностическая значимость данной пробы у пациентов с ЛГ пока не изучена [51].

У 85 пациентов при ЧВКС с тремя провокационными маневрами (пассивный подъем ног, велотренажер с целевой нагрузкой на спине и быстрое вливание кристаллоидной жидкости) корреляции между гемодинамическими изменениями, связанными с пассивным подъемом ног, физической нагрузкой и нагрузкой жидкостью были умеренными. В зависимости от провокационного маневра и критериев классификации наблюдались значительные различия в количестве переклассифицированных пациентов [52].

Поскольку глубокий вдох вызывает широкий набор физиологических эффектов, в том числе, снижение центрального венозного давления, повышение венозного возврата к сердцу и изменение электропроводности легких [53] некоторые исследователи предлагают рассматривать его как «мягкую» функциональную пробу, которая может иметь полезную диагностическую информацию при ЛГ. В пилотном исследовании у 80 больных ИЛГ и ХТЭЛГ было выявлено два варианта изменений положения электрической оси сердца во время глубокого вдоха: смещение по сравнению со спокойным дыханием вправо (аналогичное описанному у здоровых лиц) и влево (у 63% пациентов). Больные с «парадоксальным» поведением электрической оси сердца на вдохе характеризовались более высокими значениями ЛСС, индекса эксцентричности, снижением объемов левого желудочка, ударного объема и сердечного выброса [54].

Заключение

Можно надеяться, что в будущем концептуальные подходы к использованию ЭКГ при обследовании пациентов с ЛГ претерпят такие же изменения, как и парадигма электрокардиографической диагностики гипертрофии левого желудочка [55]. А именно, изменения ЭКГ, как фундаментальный маркер электрофизиологического ремоделирования, расширят понимание основных электрических процессов, протекающих в миокарде при ЛГ, и их роль для стратификации сердечно-сосудистого риска. В будущем мультимодальный подход, объединяющий цифровую ЭКГ, данные других методов исследования и методы машинного обучения, вероятно, улучшит комплексную оценку состояния сердца у больных ЛГ и послужит основой для более точной диагностики, целенаправленного подбора терапии и улучшения прогноза.

Список литературы / References

1. Авдеев С.Н., Барбараш О.Л., Валиева З.С., Волков А.В., Веселова Т.Н., Галвич А.С., Гончарова Н.С., Горбачевский С.В., Грамович В.В., Данилов Н.М., Клименко А.А., Мартынюк Т.В., Моисеева О.М., Рыжкова Д.В., Симаква М.А., Синицын В.Е., Стукалова О.В., Чазова И.Е., Черногров И.Е., Шмальц А.А., Царева Н.А. Легочная гипертензия, в том числе хроническая тромбоэмболическая легочная гипертензия. Клинические рекомендации 2024. Российский кардиологический журнал. 2024; 29(11):6161. doi: 10.15829/1560-4071-2024-6161. Avdeev S.N., Barbarash O.L., Valieva Z.S., Volkov A.V., Veselova T.N., Galyavich A.S., Goncharova N.S., Gorbachevsky S.V., Gramovich V.V., Danilov N. M., Klimenko A.A., Martynyuk T.V., Moiseeva O.M., Ryzhkova D.V., Simakova M.A., Sinitsyn V.E., Stukalova O.V., Chazova I.E., Chernogrirov I.E., Shmalts A.A., Tsareva N.A. 2024 Clinical practice guidelines for Pulmonary hypertension, including chronic thromboembolic pulmonary hypertension. Russian Journal of Cardiology. 2024; 29(11):6161. doi: 10.15829/1560-4071-2024-6161.
2. Чазова И.Е., Мартынюк Т.В., Шмальц А.А., Грамович В.В., Данилов Н.М., Веселова Т.Н., Коробкова И.З., Сарыбаев А.Ш., Стукалова О.В., Азизов В.А., Барбараш О.Л., Галвич А.С., Горбачевский С.В., Медведева И.В., Матчин Ю.Г., Мукаров М.А., Наконечников С.Н., Филиппов Е.В., Черногров И.Е. Европейские рекомендации по диагностике и лечению легочной гипертензии (2023). Евразийский Кардиологический Журнал. 2024; (1): 6–85. doi: org/10.38109/2225-1685-2024-1-6-85. Chazova I.E., Martynyuk T.V., Shmalts A.A., Gramovich V.V., Danilov N.M., Veselova T.N., Korobkova I.Z., Sarybaev A.Sh., Stukalova O.V., Barbarash O.L., Azizov V.A., Galyavich A.S., Gorbachevsky S.V., Medvedeva E.A., Matchin Y.G., Mukarov M.A., Nakonechnikov S.N., Filippov E.V., Chernogrirov I.E. Eurasian guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension (2023). Eurasian heart journal. February 2024; (1):6-85 (in Russ.) https://doi.org/10.38109/2225-1685-2023-1-6-85.
3. Whitman IR, et al. Validity of the surface electrocardiogram criteria for right ventricular hypertrophy: the MESA-RV Study (Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis-Right Ventricle). J Am Coll Cardiol. 2014; 63(7): 672–681.
4. Mirzajadani M, Naderi N, Chenaghloou M, Taghavi S, Amin A. The prediction of right atrial pressure using electrocardiogram: a novel approach. ESC Heart Fail. 2021; 8(6):5040-5044. doi: 10.1002/ehf2.13570.
5. Luo J, Sun J, Xu L, Chen J, Chen Y, Chen W, Qiu H, Luo X, Chen S, Li J. Analysis of relationship between P wave dispersion and diagnosis of pulmonary arterial hypertension and risk stratification. J Electrocardiol. 2023; 81:94–100. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2023.08.002.
6. Michalski TA, Pszczola J, Lisowska A, Knapp M, Sobkowicz B, Kaminski K, Ptaszynska-Kopczynska K. ECG in the clinical and prognostic evaluation of patients with pulmonary arterial hypertension: an underestimated value. Ther Adv Respir Dis. 2022; 16:17534666221087846. doi: 10.1177/17534666221087846.
7. Stawek-Szymt S, Araszkiewicz A, Jankiewicz S, Smukowska-Gorynia A, Grygier M, Janus M, Lesiak M, Mularek-Kubzdela T. Association of Electrocardiographic Signs of Right Ventricular Hypertrophy and Clot Localization in Chronic Thromboembolic Pulmonary Hypertension. J Clin Med. 2022; 11(3):625. doi: 10.3390/jcm11030625.
8. Tokgözü HC, Öcal BE, Erkuş YC, Tanyeri S, Kültürsay B, Tosun A, Keskin B, Hakgör A, Şırma D, Buluş Ç, Karagöz A, Tanboğa İH, Külahçıoğlu Ş, Bayram Z, Sekban A, Özdemir N, Kaymaz C. Remembering the Occam's Razor: Could Simple Electrocardiographic Findings Provide Relevant Predictions for Current Hemodynamic Criteria of Pulmonary Hypertension? Anatol J Cardiol. 2023; 27(11):664–672. doi: 10.14744/AnatolJCardiol.2023.3181.
9. Michalski TA, Smorąg M, Bukata N, Zygmunt M, Kachnic N, Lis E, Zaczaryńska K, Wilczek Ł, Wziątek B, Kopeć G. ECG patterns to predict pulmonary arterial hypertension in patients with severe tricuspid regurgitation. J Electrocardiol. 2024; 82:52–58. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2023.11.009.
10. Elifok A, Emet S, Karaayvaz EB, Erdogan O, Aydoğan M, Engin B, Cevik E, Orta H, Okumus G, Bilge AK. The relationship between T-wave peak-to-end interval and hemodynamic parameters in patients with pulmonary arterial hypertension. Ann Noninvasive Electrocardiol. 2020; 25(5): e12764. doi: 10.1111/anec.12764.

11. Сахнова Т.А., Блинова Е.В., Рябыкина Г.В., Белевская А.А., Юрасова Е.С., Роденков О.В., Мартынюк Т.В., Саидова М.А. Тип комплекса QRS как показатель тяжести поражения сердца у больных легочной гипертензией. Кардиологический вестник. – 2020. Т. 15, № 1. с. 37–45. doi:10.36396/MS.2020.82.98.006.
- Sakhnova T.A., Blinova E.V., Ryabykina G.V., Belevskaya A.A., Yurasova E.S., Rodnenkov O.V., Martynyuk T.V., Saidova M.A. The type of QRS complex as an indicator of the severity of heart damage in patients with pulmonary hypertension. *Cardiological Bulletin*. – 2020. Vol. 15, No. 1, pp. 37–45. doi:10.36396/MS.2020.82.98.006.
12. Wang F, Wang L, Yan C, Chang X, Wang H, Zhu K, Xu Y, Xu D. Algorithms of Electrocardiographic Changes for Quantitative and Localization Analysis of Thrombus Burden in Patients with Acute Pulmonary Thromboembolism. *Rev Cardiovasc Med*. 2023; 24(10):281. doi: 10.31083/j.rcm2410281.
13. Jansen SMA, Huis In 't Veld AE, Jacobs W, Grotjohan HP, Waskowsky M, van der Maten J, van der Weerd A, Hoekstra R, Overbeek MJ, Mollema SA, Tolén PHCG, Hassan El Bouazzaoui LH, Vriend JWJ, Roorda JMM, de Nooijer R, van der Lee I, Voogel BAJ, Peels K, Macken T, Aerts JM, Vonk Noordegraaf A, Handoko ML, de Man FS, Bogaard HJ. Noninvasive Prediction of Elevated Wedge Pressure in Pulmonary Hypertension Patients Without Clear Signs of Left-Sided Heart Disease: External Validation of the OPTICS Risk Score. *J Am Heart Assoc*. 2020; 9(15): e015992. doi: 10.1161/JAHA.119.015992.
14. Coghlan JG, Denton CP, Grünig E, Bolderman D, Distler O, Khanna D, Müller-Ladner U, Pope JE, Vonk MC, Doelberg M, Chadha-Boreham H, Heinzl H, Rosenberg DM, McLaughlin VV, Seibold JR; DETECT study group. Evidence-based detection of pulmonary arterial hypertension in systemic sclerosis: the DETECT study. *Ann Rheum Dis*. 2014; 73(7):1340–9. doi: 10.1136/annrheumdis-2013-203301.
15. Dzikowska-Diduch O, Kurnicka K, Lichodziejewska B, Dudzik-Niewiadomska I, Machowski M, Roik M, Wiśniewska M, Siwiec J, Staniszevska IM, Pruszczyk P. Electrocardiogram, Echocardiogram and NT-proBNP in Screening for Thromboembolism Pulmonary Hypertension in Patients after Pulmonary Embolism. *J Clin Med*. 2022; 11(24):7369. doi: 10.3390/jcm11247369.
16. Nilsson LT, Andersson T, Carlberg B, Johansson LÅ, Söderberg S. Electrocardiographic abnormalities and NT-proBNP levels at long-term follow-up of patients with dyspnea after pulmonary embolism. *Scand Cardiovasc J*. 2024; 58(1):2373090. doi: 10.1080/14017431.2024.2373090.
17. Dai J, Liu T, Zhang H, Sun X, Tang Y, Qian W, Zhang Y, Ye H, Shan L, Li L, Du M, Li D, Zhu Y, Ma K, Liu L, Wang Q, Zhou L. Fragmented QRS complex could predict all-cause mortality in patients with connective tissue disease-associated pulmonary arterial hypertension. *Rheumatology (Oxford)*. 2024; keae084. doi: 10.1093/rheumatology/keae084.
18. Hendriks PM, Kauling R, Geenen LW, Eindhoven JA, Roos-Hessink JW, Boomars KA, van den Bosch AE. Role of the electrocardiogram in the risk stratification of pulmonary hypertension. *Heart*. 2023; 109(3):208–215. doi: 10.1136/heartjnl-2022-321475.
19. Waligóra M, Gliniak M, Bylica J, Pasieka P, Łączak P, Podolec P, Kopeć G. Extended Precordial T Wave Inversions Are Associated with Right Ventricular Enlargement and Poor Prognosis in Pulmonary Hypertension. *J Clin Med*. 2021; 10(10):2147. doi: 10.3390/jcm10102147.
20. Lui JK, Sangani RA, Chen CA, Bujur AM, Trojanowski MA, Gopal DM, LaValley MP, Soylemez Wiener R, Klings ES. Prognostic Value of Cardiac Axis Deviation in Systemic Sclerosis-Related Pulmonary Hypertension. *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2022; 74(7):1219–1226. doi: 10.1002/acr.24724.
21. Minhas J, Moutchia J, Al-Naamani N, Mazurek JA, Holmes JH, Appleby D, Smith KA, Fritz JS, Pugliese SC, Palevsky HI, Kawut SM. Electrocardiographic Abnormalities and Their Association with Outcomes in Randomized Clinical Trials of Pulmonary Arterial Hypertension. *Ann Am Thorac Soc*. 2024; 21(6):858–865. doi: 10.1513/AnnalsATS.202307-609OC.
22. Карабашева М.Б., Данилов Н.М., Сагайдак О.В., Матчин Ю.Г., Чазова И.Е. Динамика ЭКГ-показателей у больных хронической тромбоэмболической легочной гипертензией после транслюминальной баллонной ангиопластики легочных артерий. Системные гипертензии. 2019; 16(2):28–31. doi: 10.26442/2075082X.2019.2.190180.
- Karabasheva M.B., Danilov N.M., Sagaidak O.V., Matchin Yu.G., Chazova I.E. Dynamics of ECG indicators in patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension after transluminal pulmonary balloon angioplasty. *Systemic Hypertension*. 2019; 16(2): 28–31. (In Russ.) DOI: 10.26442/2075082X.2019.2.190180.
23. Piłka M, Darocha S, Banaszkiewicz M, Wieteska-Mitek M, Mańczak M, Mańczak R, Kędzierski P, Floryczek M, Dobosiewicz A, Torbicki A, Kurzyńska M. Assessment of electrocardiographic markers of acute and long-term hemodynamic improvement in patients with pulmonary hypertension. *Ann Noninvasive Electrocardiol*. 2020; 25(5): e12758. doi: 10.1111/anec.12758.
24. Kariki O, Karyofyllis P, Millis P, Saplaouras A, Dragasis S, Chatziantoniou A, Alexiou D, Patsiotis IG, Letsas KP, Efremidis M. Electrocardiographic changes after balloon pulmonary angioplasty in chronic thromboembolic pulmonary hypertension: Data from the Hellenic Registry. *J Electrocardiol*. 2023;81:26–31. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2023.07.006.
25. Kol A, Kepez A, Akaslan D, Kanar B, Atas H, Mutlu B. Effects of balloon pulmonary angioplasty procedure on electrocardiographic parameters in patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension. *J Electrocardiol*. 2023; 77:72–77. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2023.01.013.
26. Guo T, Zeng XM, Huang HQ, Wu XF, Guo WL, Chen HM, Zhong QN, Yang X, Ye HL, Hong C. ECG changes following balloon pulmonary angioplasty in patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension: a retrospective study. *J Cardiothorac Surg*. 2024;19(1):484. doi: 10.1186/s13019-024-02960-z.
27. Ley L, Wiedenroth CB, Ghoofrani HA, Hoeltgen R, Bandorski D. Analysis of Electrocardiographic Criteria of Right Ventricular Hypertrophy in Patients with Chronic Thromboembolic Pulmonary Hypertension before and after Balloon Pulmonary Angioplasty. *J Clin Med*. 2023; 12(13):4196. doi: 10.3390/jcm12134196.
28. Piłka M, Mańczak M, Darocha S, Banaszkiewicz M, Mańczak R, Floryczek M, Kędzierski P, Pietrasik A, Balsam P, Kurzyńska P, Wasilewski M, Wolański R, Torbicki A, Kurzyńska M. Assessment of Clinical Usefulness of Resting Electrocardiogram (PH-ECG Score) in Monitoring the Efficacy of Balloon Pulmonary Angioplasty (BPA) in Patients with Chronic Thromboembolic Pulmonary Hypertension (CTEPH). *J Clin Med*. 2021; 10(19):4548. doi: 10.3390/jcm10194548.
29. Piłka M, Darocha S, Floryczek M, Mańczak R, Banaszkiewicz M, Kędzierski P, Zieliński D, Wróbel K, Torbicki A. The Utility of a Resting Electrocardiogram (ECG-PH Index) in Evaluating the Efficacy of Pulmonary Endarterectomy in Chronic Thromboembolic Pulmonary Hypertension. *J Clin Med*. 2023; 12(24):7621. doi: 10.3390/jcm12247621.
30. Şahan E, Aydemir S. Evaluation of thrombolytic treatment effect on frontal plane QRS-T angle in patients with acute pulmonary embolism: A novel marker of successful thrombolysis. *Herz*. 2021; 46(Suppl 2):187–190. doi: 10.1007/s00059-020-04978-0.
31. Wade RC, Mkorombindo T, Ling SX, Helgeson ES, MacDonald DM, Pew K, Voelker H, Bittner V, Kunisaki KM, Lammi MR, Dransfield MT. Association between P-pulmonale and respiratory morbidity in COPD: a secondary analysis of the BLOCK-COPD trial. *BMC Pulm Med*. 2023; 23(1):434. doi: 10.1186/s12890-023-02748-2.
32. Pan D, Liu R, Ren S, Li C, Chang Q. Prediction of Pulmonary Arterial Hypertension in Chronic Obstructive Lung Disease from Three-Dimensional Vectorcardiographic Parameters. *Ann Noninvasive Electrocardiol*. 2016; 21(3): 280–6. doi: 10.1111/anec.12305.
33. Haecck ML, Kapel GF, Scherpfong RW, Swenne CA, Maan AC, Bax JJ, Schallij MJ, Vliegen HW. Detection of elevated pulmonary pressures by the ECG-derived ventricular gradient: A comparison of conversion matrices in patients with suspected pulmonary hypertension. *J Electrocardiol*. 2017; 50(1): 115–122. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2016.09.002.
34. Couperus LE, Vliegen HW, Henkens IR, Maan AC, Treskes RW, de Vries JK, Schoufoer AA, Swenne CA, Schallij MJ, Scherpfong RW. Electrocardiographic detection of pulmonary hypertension in patients with systemic sclerosis using the ventricular gradient. *J Electrocardiol*. 2016; 49(1):60–8. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2015.09.003.
35. Meijer FMM, Kies P, Jongbloed MRM, van Wijngaarden SE, Swenne CA, Maan S, Schallij MJ, de Vries-Bouwstra JK, Vliegen HW. ECG derived ventricular gradient exceeds echocardiography in the early detection of pulmonary hypertension in scleroderma patients. *Int J Cardiol*. 2018; 273:203–206. doi: 10.1016/j.ijcard.2018.07.122.
36. Kamphuis VP, Haecck ML, Wagner GS, Maan AC, Maynard C, Delgado V, Vliegen HW, Swenne CA. Electrocardiographic detection of right ventricular pressure overload in patients with suspected pulmonary hypertension. *J Electrocardiol*. 2014; 47(2):175–82. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2013.10.010.
37. Jaroszyński A, Schlegel TT, Zaborowski T, Zapolski T, Zaluska W, Janion-Sadowska A, Kozłowski D, Głuszek S, Dąbrowski W. The value of ventricular gradient for predicting pulmonary hypertension and mortality in hemodialysis patients. *Sci Rep*. 2022; 12(1):456. doi: 10.1038/s41598-021-04186-8.
38. El-Bokli A, Jimenez E, Hiremath G, Cortez D. Is derived vectorcardiography a potential screening tool for pulmonary hypertension? *J Electrocardiol*. 2022; 70:79–83. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2021.12.004.
39. Meijer FMM, Hendriks SV, Huisman MV, van der Hulle T, Swenne CA, Kies P, Jongbloed MRM, Egorova AD, Vliegen HW, Klok FA. Lack of diagnostic utility of the ECG-derived ventricular gradient in patients with suspected acute pulmonary embolism. *J Electrocardiol*. 2020; 61:141–146. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2020.06.006.
40. Lijfjens D, Meijer FMM, Boon GJAM, Ende-Verhaar YM, Bavalia R, El Bouazzaoui LH, Delcroix M, Huisman MV, Mairuhu ATA, Middeldorp S, Pruszczyk P, Ruigrok D, Verhamme P, Vonk Noordegraaf A, Vriend JWJ, Vliegen HW, Klok FA. Diagnostic efficacy of ECG-derived ventricular gradient for the detection of chronic thromboembolic pulmonary hypertension in patients with acute pulmonary embolism. *J Electrocardiol*. 2022; 74:94–100. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2022.08.007.
41. DuBrock HM, Wagner TE, Carlson K, Carpenter CL, Awasthi S, Attia ZI, Frantz RP, Friedman PA, Kapa S, Annis J, Brittain EL, Hemnes AR, Asirvatham SJ, Babu M, Prasad A, Yoo U, Barve R, Selej M, Agron P, Kogan E, Quinn D, Dunnmon P, Khan N, Soundararajan V. An electrocardiogram-based AI algorithm for early detection of pulmonary hypertension. *Eur Respir J*. 2024; 64(1):2400192. doi: 10.1183/13993003.00192-2024.
42. Tison GH, Zhang J, Delling FN, Deo RC. Automated and Interpretable Patient ECG Profiles for Disease Detection, Tracking, and Discovery. *Circ Cardiovasc Qual Outcomes*. 2019; 12(9): e005289. doi: 10.1161/CIRCOUTCOMES.118.005289.
43. Aras MA, Abreau S, Mills H, Radhakrishnan L, Klein L, Mantri N, Rubin B, Barrios J, Chehoud C, Kogan E, Giffon X, Nnewiwe A, Quinn D, Bridges C, Butte AJ, Olgin JE, Tison GH. Electrocardiogram Detection of Pulmonary Hypertension Using Deep Learning. *J Card Fail*. 2023; 29(7):1017–1028. doi: 10.1016/j.cardfail.2022.12.016.
44. Kwon JM, Kim KH, Medina-Inojosa J, Jeon KH, Park J, Oh BH. Artificial intelligence for early prediction of pulmonary hypertension using electrocardiography. *J Heart Lung Transplant*. 2020; 39(8):805–814. doi: 10.1016/j.healun.2020.04.009.
45. Liu CM, Shih ESC, Chen JY, Huang CH, Wu IC, Chen PF, Higa S, Yagi N, Hu YF, Hwang MJ, Chen SA. Artificial Intelligence-Enabled Electrocardiogram Improves the Diagnosis and Prediction of Mortality in Patients with Pulmonary Hypertension. *JACC Asia*. 2022; 2(3):258–270. doi: 10.1016/j.jaccasi.2022.02.008.
46. Liu PY, Hsing SC, Tsai DJ, Lin C, Lin CS, Wang CH, Fang WH. A Deep-Learning-Enabled Electrocardiogram and Chest X-Ray for Detecting Pulmonary Arterial Hypertension. *J Imaging Inform Med*. 2024. doi: 10.1007/s10278-024-01225-4.
47. Moghaddam N, Swiston JR, Weatherall D, Mielniczuk L, Kapasi A, Hambly N, Langleben D, Brunner NW. Impact of saline loading at cardiac catheterization on echocardiographic parameters in patients with pulmonary hypertension. *Am J Cardiol*. 2020; 125(1):1–7. doi: 10.1016/j.amjcard.2019.09.010.

- terization on the classification and management of patients evaluated for pulmonary hypertension. *Int J Cardiol.* 2020; 306:181-186. doi: 10.1016/j.ijcard.2019.11.104.
48. Kaiser KN, Almoushref A, Mehta AK, Alkhayat M, Lane JE, Tonelli AR. Fluid loading during the hemodynamic evaluation of pulmonary hypertension: a cross-sectional study. *Cardiovasc Diagn Ther.* 2023; 13(5):833-842. doi: 10.21037/cdt-23-59.
 49. Kremer N, Rako Z, Douschan P, Gall H, Ghojani HA, Grimminger F, Guth S, Naeije R, Rieth A, Schulz R, Seeger W, Tedford RJ, Vadasz I, Vanderpool R, Wiedenroth CB, Richter MJ, Tello K. Unmasking right ventricular-arterial uncoupling during fluid challenge in pulmonary hypertension. *J Heart Lung Transplant.* 2022; 41(3):345-355. doi: 10.1016/j.healun.2021.11.019.
 50. D'Alto M, Motoji Y, Romeo E, Argiento P, Di Marco GM, Matterna Iacono A, D'Andrea A, Rea G, Golino P, Naeije R. Fluid challenge predicts clinical worsening in pulmonary arterial hypertension. *Int J Cardiol.* 2018; 261:167-171. doi: 10.1016/j.ijcard.2018.03.020.
 51. Arunachalam A, Chaisson NF, Tonelli AR. Methods to improve the yield of right heart catheterization in pulmonary hypertension. *Respiratory Medicine.* X. 2020; 2:100015. doi: 10.1016/j.ymex.2020.100015.
 52. Montané B, Tonelli AR, Arunachalam A, Bhattacharya A, Li M, Wang X, Chaisson NF. Hemodynamic Responses to Provocative Maneuvers during Right Heart Catheterization. *Ann Am Thorac Soc.* 2022; 19(12):1977-1985. doi: 10.1513/AnnalsATS.202201-077OC.
 53. Баркан ВС, Дроздов ДВ, Резветсов ГД. Электрокардиограмма на вдохе: физиологические механизмы и диагностические возможности пробы. *Медицинский алфавит.* 2023; (22):36-42. Doi:10.33667/2078-5631-2023-22-36-42. Barkan V.S., Drozdov D.V., Rezvetsov G.G. Deep inspiration electrocardiogram test: physiologic mechanisms and diagnostic capabilities. *Medical alphabet.* 2023;(22):36-42. DOI 10.33667/2078-5631-2023-22-36-42.
 54. Сахнова Т.А., Блинова Е.В., Мартынюк Т.В., Белевская А.А., Саидова М.А., Дроздов Д.В. Связь изменений электрической оси сердца на вдохе со структурно-функциональным состоянием сердца по данным эхокардиографии у больных прекапиллярной легочной гипертензией Системные гипертензии. 2024;21(2):5-20. Doi:10.38109/2075-082X-2024-2-5-20. Sakhnova T.A., Blinova E.V., Martynyuk T.V., Belevskaya A.A., Saidova M.A., Drozdov D.V. Relationship between changes in the electrical axis of the heart during inspiration and the structural and functional state of the heart according to echocardiography in patients with precapillary pulmonary hypertension. *Systemic Hypertension.* 2024;21(2):5-20. (in Russ.). <https://doi.org/10.38109/2075-082X-2024-2-5-20>.
 55. Bacharova L, Chevalier P, Gorenek B, Jons C, Li YG, Locati ET, Maanja M, Pérez-Riera AR, Platonov PG, Ribeiro ALP, Schocken D, Soliman EZ, Svehlikova J, Tereshchenko LG, Ugander M, Varma N, Zaklyazminskaya E, Ikeda T. ISE/ISHNE expert consensus statement on the ECG diagnosis of left ventricular hypertrophy: The change of the paradigm. *Ann Noninvasive Electrocardiol.* 2024; 29(1):e13097. doi: 10.1111/anecl.13097.

Статья поступила / Received 13.10.2024
Получена после рецензирования / Revised 23.10.2024
Принята в печать / Accepted 23.10.2024

Информация об авторах

Соболев Александр Владимирович, д.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории ЭКГ
ORCID: 0000-0002-8040-0770
Блинова Елена Валентиновна, к.м.н., научный сотрудник Лаборатории ЭКГ
ORCID: 0000-0001-8725-7084
Сахнова Тамара Анатольевна, к.м.н., старший научный сотрудник Лаборатории ЭКГ
ORCID: 0000-0002-5543-7184
Дроздов Дмитрий Владимирович, к.м.н., руководитель Лаборатории ЭКГ
ORCID: 0000-0001-7374-3604

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии имени академика Е.И. Чазова» МЗ РФ

Контактная информация:

Сахнова Тамара Анатольевна. E-mail: tamara-sakhnova@mail.ru

Для цитирования: Соболев А.В., Блинова Е.В., Сахнова Т.А., Дроздов Д.В. Электрокардиография при легочной гипертензии: поиск новых диагностических возможностей (обзор литературы). *Медицинский алфавит.* 2024;(30):28-35. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-30-28-35>

Author information

Sobolev Alexander V., Doctor of Technical Sciences, leading researcher, ECG Laboratory
ORCID: 0000-0002-8040-0770
Blinova Elena V., Research Officer, ECG Laboratory
ORCID: 0000-0001-8725-7084
Sakhnova Tamara A., Senior Scientist, ECG Laboratory
ORCID: 0000-0002-5543-7184
Drozdov Dmitry V., Head of ECG Laboratory
ORCID: 0000-0001-7374-3604

Federal State Budgetary Institution «National Medical Research Centre of Cardiology named after academician E.I. Chazov» of the Ministry of Health of the Russian Federation

Contact information

Tamara A. Sakhnova. E-mail: tamara-sakhnova@mail.ru

For citation: Sobolev A.V., Blinova E.V., Sakhnova T.A., Drozdov D.V. Electrocardiography in pulmonary hypertension: search for new diagnostic possibilities (literature review). *Medical alphabet.* 2024;(30):28-35. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-30-28-35>

