

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КРАСНОЯРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
ПРОФЕССОРА В. Ф. ВОЙНО-ЯСЕНЕЦКОГО»
МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На правах рукописи

Пфейфер Александр Андреевич

**ДИАГНОСТИКА И ИНТЕНСИВНОЕ ЛЕЧЕНИЕ ДЕТЕЙ С ОСТРОЙ
ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ ПОСЛЕ РАДИКАЛЬНЫХ
КАРДИОХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА ОСНОВЕ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНИРОВАНИЯ**

3.1.12. Анестезиология и реаниматология

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Научный руководитель:

доктор медицинских наук, профессор

Грицан Алексей Иванович

Красноярск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.	5
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ИССЛЕДОВАНИИ ЛЁГКИХ У ДЕТЕЙ В ОТДЕЛЕНИИ АНЕСТЕЗИОЛОГИИ И РЕАНИМАЦИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	18
1.1 Методика ультразвукового исследования лёгких.	20
1.2 Нормальная ультразвуковая картина лёгких.	24
1.3 Диффузный интерстициальный синдром.	26
1.4 Синдром альвеолярной консолидации: пневмония, ателектаз.	31
1.5 Пневмоторакс.	36
1.6 Плевральный выпот.	39
1.7 Движение диафрагмы: норма, паралич, слабость, парадоксальное движение.	42
1.8 Ультразвуковое исследование лёгких и отлучение от искусственной вентиляции лёгких в детской кардиохирургии.	48
1.9 Ультразвуковое исследование лёгких и рекрутмент-маневр в детской кардиохирургии.	49
1.10 Ультразвуковое исследование и сложное поражение лёгких в детской кардиохирургии.	51
1.11 Резюме.	53
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ.	59
2.1 Первый этап исследования (пилотный)	61
2.1.1 Сбор данных.	63
2.1.2 Алгоритм перевода пациента из отделения реанимации и обоснование выбора критериев острой дыхательной недостаточности.	72
2.1.3 Критерии острой дыхательной недостаточности.	73
2.2 Второй этап исследования (заключительный).	73
2.2.1 Сбор данных для описания ультразвуковой семиотики патологических изменений в лёгких у детей с острой дыхательной недостаточностью,	

выявления взаимосвязи клинических и инструментальных данных с острой дыхательной недостаточностью и оценки их диагностической ценности.	78
2.2.2 Сбор данных для оценки эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики острой дыхательной недостаточности.	80
2.2.3 Критерии эффективности и безопасности интенсивной терапии.	82
2.3 Протоколы интенсивной терапии.	83
2.3.1 Общие принципы.	83
2.3.2 Специфическая терапия под контролем ультразвукового исследования лёгких.	87
2.3.3 Терапия в контрольной группе.	90
2.4 Статистическая обработка данных.	90
2.4.1. Общие принципы статистического анализа.	90
2.4.2 Статистический анализ для создания прогностической модели и выявления независимых предикторов развития острой дыхательной недостаточности.	91
2.4.3 Статистический анализ для описания ультразвуковой семиотики патологических изменений в лёгких у детей с острой дыхательной недостаточностью.	93
2.4.4 Статистический анализ для выявления взаимосвязи клинических и инструментальных данных с острой дыхательной недостаточностью и их диагностической ценности.	94
2.4.5 Статистический анализ для оценки эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких.	96
ГЛАВА 3 СОЗДАНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ВЫЯВЛЕНИЕ НЕЗАВИСИМЫХ ПРЕДИКТОРОВ РАЗВИТИЯ ОСТРОЙ ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ.	96
3.1 Прогностическая модель на основе алгоритма Random Forest.	96
3.2 Прогностическая модель на основе логистической регрессии.	100
3.3 Независимые ультразвуковые предикторы острой дыхательной	

недостаточности.	106
3.4 Регистрация модели как программы для электронной вычислительной машины.	107
3.5 Обсуждение результатов.	107
3.6 Резюме.	112
ГЛАВА 4 ОПИСАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СЕМИОТИКИ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛЁГКИХ У ДЕТЕЙ С ОСТРОЙ ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ.	114
4.1 Обсуждение результатов.	122
4.2 Резюме.	125
ГЛАВА 5 ВЗАИМОСВЯЗЬ КЛИНИЧЕСКИХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ОСТРОЙ ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ И ИХ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.	126
5.1 Взаимосвязь клинических и инструментальных данных с острой дыхательной недостаточностью.	126
5.2 Диагностическая ценность клинических и инструментальных данных. ...	128
5.3 Обсуждение результатов.	133
5.4 Резюме.	138
ГЛАВА 6 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИВНОГО ЛЕЧЕНИЯ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛЁГКИХ С ЦЕЛЬЮ ПРОФИЛАКТИКИ ОСТРОЙ ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНИРОВАНИЯ ЛЁГКИХ.	140
6.1 Обсуждение результатов.	144
6.2 Резюме.	152
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	153
ВЫВОДЫ.	162
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.	164
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	169
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА.	183

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы

Патология дыхательной системы является наиболее часто встречающейся патологией детства и обуславливает до 50 % от всех случаев неонатальной смерти [18]. Известны классические методы диагностики заболеваний дыхательной системы, но все они имеют свои ограничения, особенно при критических состояниях и ограниченности в транспортировке пациента. В последние десятилетия развивается новый метод диагностики респираторного такта, который уже зарекомендовал себя во взрослой практике и активно внедряется в педиатрическую.

Острая дыхательная недостаточность (ОДН) – состояние организма, при котором не обеспечивается поддержание нормального газового состава артериальной крови, либо оно достигается за счет повышенной работы внешнего дыхания, приводящей к снижению функциональных резервов организма, либо поддерживается искусственным путем [10]. В одних исследованиях в области кардиохирургии, ОДН диагностируют при соотношении $PaO_2 / FiO_2 < 300$ в послеоперационном периоде [11]. Другие авторы полагают, что для ОДН после кардиохирургических операций обязательным критерием является механическая вентиляция лёгких (МВЛ) не менее 24 часов [12], а в случае меньшей длительности некоторыми исследователями используется термин «послеоперационная дисфункция лёгких» [59]. Учитывая мультифакторность принятия решения о проведении продленной МВЛ в послеоперационном периоде, включая как выраженную недостаточность дыхательной системы, так и недостаточности других систем и органов, характер и объем перенесенного оперативного вмешательства, наличие интра- и послеоперационных осложнений, а также опыт врача-реаниматолога и различные парамедицинские факторы, в настоящем исследовании использован термин «ОДН», независимо от продолжительности МВЛ.

Острая дыхательная недостаточность после операции на сердце

многофакторна и включает неблагоприятные эффекты общей анестезии, в том числе ятрогенного ателектазирования при индуцированном апноэ в момент выполнения основного этапа операции, применение искусственного кровообращения (ИК), хирургической травмы, а также гипотермии [5, 17, 27]. Важнейшей особенностью детской кардиохирургии является применение ИК на фоне исходной незрелости лёгких [1]. Дети предрасположены к развитию ОДН по многим причинам: малый диаметр бронхов, который приводит к высокому сопротивлению в них, высокая эластичность и податливость хрящевого каркаса дыхательных путей, что наряду с недостаточным количеством эластических элементов проявляется в склонности к спаданию дыхательных путей и развитию обструктивного синдрома, а также снижению легочного комплаенса, богатая васкуляризация лёгких с выраженным развитием междолевой соединительной ткани приводит к увеличению толщины альвеолокапиллярного барьера и предрасполагает к развитию отека лёгких, примитивный характер строения ацинусов и сниженная активность сурфактанта приводят к снижению компенсаторных возможностей дыхательной системы [1]. В этой связи, выявляющаяся после операции ОДН, является хотя и отягчающим, но весьма распространённым, «привычным» фактором раннего послеоперационного периода [16]. Нередко умеренные проявления данного синдрома не рассматривают в качестве противопоказаний для перевода ребёнка из реанимационного отделения, а низкопоточную кислородотерапию осуществляют в палате кардиохирургического отделения [58]. Вместе с тем, ОДН может существенно ухудшать прогноз, а также увеличивать сроки лечения пациентов, что делает актуальным поиск эффективных методов ранней диагностики и мониторинга состояния лёгких в послеоперационном периоде [81]. Ультразвуковое исследование (УЗИ) лёгких в последние годы активно внедряется в клиническую практику как неинвазивный, безопасный и высокоинформативный метод [14], имеющий в педиатрии очевидные преимущества перед рентгенографией [6].

Основателем данного метода диагностики лёгких на основе оценки ультразвуковых артефактов стал «врач интенсивист» Daniel Lichtenstein,

усилиями которого начались быстрое освоение и разработка методики исследования у детей [118].

В данный момент появляется все больше данных о том, что ультразвуковая визуализация способствует своевременному выявлению патологии лёгких в отделениях интенсивной терапии [15], а также, что она обладает высокой чувствительностью при многих патологических процессах в лёгких: альвеолярным консолидациям [53], интерстициальному синдрому [26, 123], гидротораксу [31, 125], пневмотораксу [13, 86, 53, 126].

Важным этапом принятия и совершенствования метода УЗИ лёгких стал 2012 г. Именно в этом году Международный объединенный комитет по изучению УЗИ лёгких, в состав которого вошли более 30 ведущих специалистов со всего мира, составил рекомендации, основанные на принципах доказательной медицины. В них убедительно показано, что УЗИ лёгких при сравнении с рентгенографией лёгких обладает большей чувствительностью в диагностике пневмоторакса, отека лёгких, очагов легочной консолидации и выпота в плевральной полости [53].

Преимуществами прикроватного УЗИ лёгких являются: быстрота диагностики (может быть выполнено в течение 2–3 минут), отсутствие ионизирующей нагрузки, отсутствие необходимости в транспортировке пациента, возможность многократного сканирования с оценкой динамики и ответа на этиотропное лечение, а также тот факт, что все исследования проводятся одним универсальным линейным датчиком.

Метод основан на нескольких основных принципах:

- 1) большинство патологических процессов, происходящих в лёгких, связаны с изменениями морфологии плевральной линии и паренхимы легкого;
- 2) все причины ОДН имеют свой характерный ультразвуковой признак, а также ряд косвенных признаков для более точной дифференциации типа патологического процесса из ультразвукового синдрома [13].

В недавно опубликованной статье сообщается, что ультразвуковая визуализация является равным, если не более эффективным диагностическим

методом, чем рентген [110].

Степень разработанности темы диссертации

Острая дыхательная недостаточность у детей грудного возраста в раннем послеоперационном периоде после кардиохирургических вмешательств остаётся одной из ключевых проблем детской анестезиологии и интенсивной терапии. Несмотря на развитие технологий искусственного кровообращения и респираторной поддержки, частота ОДН остается высокой [16]. В последние годы прикроватное УЗИ лёгких активно внедряется в клиническую практику как неинвазивный, быстрый и высокоинформативный метод, превосходящий рентгенографию в диагностике интерстициального синдрома, альвеолярной консолидации, плеврального выпота и пневмоторакса [15, 26, 31, 53, 86, 123, 125, 126]. Работы Xin H. et al., 2023, Urbankowska E. et al., 2015, Riccabona M. et al., 2008, подтвердили высокую эффективность УЗИ в оценке лёгочной патологии у детей [67, 68, 95].

Особое внимание уделяется применению УЗИ в детской кардиохирургии. Rodríguez-Fanjul J. с соавт. предложили шкалу «LUSNEHDI» (Lung Ultrasound in Neonatal Congenital Heart Disease) для оценки гиперволемии малого круга кровообращения (МКК) у новорождённых по выраженности В-линий [120]. Коллективы авторов продемонстрировали эффективность УЗИ-контролируемой коррекции ИВЛ [124], а Cantinotti M. et al. 2020, разработали прогностические модели на основе УЗИ-оценки для прогноза длительности ИВЛ и пребывания в реанимации [91]. Однако существующие подходы носят фрагментарный характер: большинство балльных систем оценивают лишь отдельные синдромы, не учитывая полный спектр ультразвуковых синдромов [26, 34, 77, 120]. Прогностические модели, представленные в литературе, не прошли внутренней валидации на независимой выборке, редко интегрируют клинические и ультразвуковые параметры, а их эффективность (AUC, чувствительность, специфичность) не оценивалась количественно [91, 120].

Отсутствуют стандартизированные, воспроизводимые протоколы,

охватывающие весь спектр ультразвуковых синдромов у детей после кардиохирургических операций. Не установлены независимые ультразвуковые предикторы ОДН и их прогностическая ценность в раннем послеоперационном периоде, а также отсутствуют валидированные на независимой выборке прогностические модели ОДН, основанные на полном спектре ультразвуковых синдромов. Отсутствуют рандомизированные данные, подтверждающие эффективность персонализированной интенсивной терапии, корректируемой в реальном времени на основе динамического УЗИ лёгких. Не были выявлены взаимосвязи между ультразвуковыми параметрами и ОДН, их диагностическая ценность. До настоящего времени не была описана ультразвуковая картина лёгких, характерная для детей грудного возраста с ОДН после радикальных кардиохирургических операций.

Таким образом, несмотря на определённые достижения, в научной литературе сохраняются существенные пробелы, определяющие актуальность и научную новизну данного исследования: отсутствие валидированной на независимой выборке прогностической модели ОДН, основанной на полном спектре ультразвуковых синдромов, неизвестна прогностическая значимость ранних ультразвуковых изменений в лёгких, недостаточно данных о влиянии персонифицированной интенсивной терапии на основе УЗИ лёгких на частоту ОДН и эффективность газообмена, нет данных о взаимосвязи между ультразвуковыми параметрами и ОДН и их диагностической ценности. Эти пробелы и определяют научную новизну настоящего исследования.

Цель исследования

Повысить качество и результативность интенсивной терапии у детей после радикальных кардиохирургических операций на основе диагностики и интенсивной терапии патологических процессов в лёгких для профилактики развития острой дыхательной недостаточности с использованием ультразвукового сканирования.

Задачи исследования

1. Создать прогностическую модель и выявить независимые предикторы развития острой дыхательной недостаточности в послеоперационном периоде у детей после радикальных кардиохирургических операций на основе ультразвукового исследования лёгких.
2. Описать ультразвуковую семиотику патологических изменений в лёгких у детей с острой дыхательной недостаточностью после радикальных кардиохирургических операций в условиях отделения анестезиологии-реанимации.
3. Выявить взаимосвязи клинических и инструментальных данных с острой дыхательной недостаточностью и оценить их диагностическую ценность.
4. Оценить эффективность интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики острой дыхательной недостаточности на основе ультразвукового исследования лёгких у детей после радикальных кардиохирургических операций.

Научная новизна

Разработан стандартизированный 12-зонный протокол ультразвукового исследования лёгких для детей грудного возраста, обеспечивающий количественную и изолированную оценку всех ключевых ультразвуковых паттернов.

Впервые создана и подвергнута внутренней валидации оригинальная модель «LUCH-D» на основе ансамблевого алгоритма машинного обучения (Random Forest), позволяющая прогнозировать риск развития ОДН в раннем послеоперационном периоде.

Установлены и количественно оценены 25 независимых предикторов ОДН, из которых 22 являются ультразвуковыми параметрами. Впервые показано, что наиболее прогностически значимые признаки локализуются в заднем отделе правого легкого и выявляются в течение 2 часов после поступления в отделение анестезиологии и реанимации (2 оценочный период исследования).

Впервые описана комплексная ультразвуковая картина лёгких у детей с

ОДН после кардиохирургических вмешательств.

Впервые выявлены взаимосвязи клинических и инструментальных данных с острой дыхательной недостаточностью и оценена их диагностическая ценность у детей с ОДН после кардиохирургических вмешательств.

Доказана эффективность персонализированной интенсивной терапии, корректируемой в реальном времени на основании данных УЗИ лёгких.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в уточнении патогенеза ОДН у детей грудного возраста после кардиохирургических операций. Был разработан стандартизированный 12-зонный протокол УЗИ лёгких, на основе которого были выявлены 25 независимых предикторов ОДН, из них 22 – ультразвуковые, создана пилотная прогностическая модель «LUCH-D» (зарегистрирована как программа для ЭВМ), позволяющая в первые 2 часа после операции выявлять пациентов с высоким риском развития ОДН, установлены взаимосвязи ультразвуковых параметров с ОДН и определена их диагностическая ценность, а также предложен алгоритм персонализированной интенсивной терапии под контролем УЗИ, который достоверно снизил частоту ОДН с 86,5 % до 32,4 % ($p < 0,001$). Следует отметить, что модель «LUCH-D» является пилотной и требует внешней валидации и многоцентровых исследований перед широким внедрением. Кроме того, было показано, что применение алгоритмов машинного обучения при создании прогностических моделей в интенсивной терапии позволяет значительно повысить их эффективности.

Таким образом, на основе полученных данных были разработаны, теоретически обоснованы и внедрены в клиническую работу отделения анестезиологии и реанимации детского (ОАРд) Федерального центра сердечно-сосудистой хирургии г. Красноярска практические рекомендации по прогнозированию, диагностике и профилактике ОДН у детей грудного возраста, на основе созданного 12-зонного протокола УЗИ лёгких.

Методология и методы диссертационного исследования

В работе использованы общие и частные принципы научного познания. Были применены теоретические и экспериментально-теоретические методы научного исследования. Проведён системный анализ актуальной научно-практической проблемы: отсутствие стандартизированного подхода к ранней диагностике и профилактике острой дыхательной недостаточности у детей грудного возраста в раннем послеоперационном периоде после кардиохирургических вмешательств в условиях искусственного кровообращения.

Методологической основой исследования послужил системный подход, позволяющий рассматривать ОДН как полиэтиологический синдром, формирование которого обусловлено взаимодействием множества клинических, патофизиологических и терапевтических факторов. Теоретическую базу составили фундаментальные и прикладные труды отечественных и зарубежных авторов в области детской кардиохирургии, анестезиологии и интенсивной терапии, ультразвуковой диагностики патологии лёгких, а также современные концепции машинного обучения в медицине. Особое внимание уделено работам, посвящённым разработке и валидации прогностических моделей на основе ультразвуковых данных, что позволило обосновать выбор методов и дизайн исследования.

Исследование выполнено на базе ОАРд Федерального центра сердечно-сосудистой хирургии г. Красноярск в период с октября 2023 года по март 2025 года. Для проведения исследования было получено разрешение локального этического комитета ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России (протокол № 122/2023 от 29.11.2023). Все пациенты были включены в исследование после получения письменного информированного добровольного согласия от законных представителей. Работа соответствует требованиям статьи 20 Федерального закона от 21.11.2011 № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации», а также приказа Минздрава России от 23.04.2012 № 390н «Об утверждении перечня определённых видов

медицинских вмешательств, на которые граждане дают информированное добровольное согласие». Обработка персональных данных пациентов осуществлялась в соответствии с положениями Федерального закона от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных».

Исследование носит одноцентровый проспективный рандомизированный контролируемый характер и включает два последовательных этапа: пилотное исследование ($n = 60$) и расширенную когорту, включившую дополнительно 11 пациентов (итого $n = 71$). Применены клинические, инструментальные, лабораторные и современные статистические методы, включая алгоритмы машинного обучения. Проверка статистических гипотез проводилась при уровне значимости $p < 0,05$.

Таким образом, сочетание клинических, лабораторных, инструментальных и современных статистических методов позволило не только выявить ключевые патофизиологические маркеры ОДН в раннем послеоперационном периоде, но и создать и валидировать прогностическую модель, а также доказать эффективность персонализированной интенсивной терапии, основанной на полученных ультразвуковых данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель «LUCH-D» позволяет прогнозировать риск развития острой дыхательной недостаточности у детей грудного возраста после радикальных кардиохирургических операций.
2. Определенные в ходе исследования ультразвуковые признаки обладают высокой диагностической ценностью для выявления острой дыхательной недостаточности у детей грудного возраста после радикальных кардиохирургических операций.
3. Персонализированная интенсивная терапия, проводимая на основе динамического мониторинга по 12-зонному протоколу ультразвукового исследования лёгких, позволяет эффективно и безопасно осуществлять профилактику острой дыхательной недостаточности у детей грудного возраста

после радикальных кардиохирургических вмешательств.

Степень достоверности

Достоверность выводов, положений и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, доказывается достаточным количеством пациентов, включенных в исследование (71 пациент), использованием современных методик и оборудования для диагностики и лечения пациентов, системным подходом к научному анализу полученных результатов с применением современных методов статистической обработки и современного программного компьютерного обеспечения. Полученные в ходе исследования результаты опубликованы в научной печати и представлены в виде докладов на научно-практических конференциях, было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Прогностическая модель «LUCN-D» на основе ансамблевого алгоритма машинного обучения Random Forest» № 2025661123 от 30.04.2025. Также был получен патент на изобретение № 2858762 «Способ ультразвукового исследования легких и плевральных полостей в послеоперационном периоде у детей кардиохирургического профиля». Все УЗИ-исследования выполнены автором с подтвержденной компетенцией, что исключает межоператорную вариабельность и обеспечивает однородность данных. Автор имеет удостоверение о повышении квалификации «УЗИ лёгких: дифференциальная диагностика при острой дыхательной недостаточности» и «УЗИ в практике анестезиолога-реаниматолога».

Апробация работы

Основные положения диссертационного исследования доложены и обсуждены на: 21-й Всероссийской научно-образовательной конференции «Рекомендации и индивидуальные подходы в анестезиологии и реаниматологии» (Геленджик, 2024), Третьем Всероссийском съезде детских кардиохирургов и специалистов по врожденным порокам сердца (Казань, 2024), Международном форуме по респираторной поддержке 2024 (Красноярск, 2024), 22-й

Всероссийской научно-образовательной конференции «Рекомендации и индивидуальные подходы в анестезиологии и реаниматологии» (Геленджик, 2025), где работа была удостоена Диплома I степени в конкурсе молодых учёных, Международном конгрессе по респираторной поддержке 2025 (Красноярск, 2025), Четвёртом Всероссийском съезде детских кардиохирургов и специалистов по врожденным порокам сердца (Самара, 2025), где работа была удостоена Диплома I степени в конкурсе молодых учёных и отмечена Премией имени профессора В. В. Алекси-Месхишвили, Форуме анестезиологов и реаниматологов России (ФАРР-2025) (Москва, 2025).

Результаты исследования получили положительную оценку научного сообщества, что подтверждает их актуальность, научную новизну и практическую значимость.

Диссертационная работа апробирована на заседании профильной проблемной комиссии «Хирургические болезни» ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России и рекомендована к защите (Красноярск, 2026).

Внедрение результатов исследования

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе на кафедре анестезиологии и реаниматологии ИПО ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России, в практической работе отделения анестезиологии-реанимации детского ФГБУ «Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии» Минздрава России (г. Красноярск). Программный продукт «Прогностическая модель «LUCH-D» на основе ансамблевого алгоритма машинного обучения Random Forest» был защищён свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025661123 от 30.04.2025.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 1 патент на изобретение, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 4 статьи в научных журналах и изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, из них 4 статьи в журналах, которые входят в международную реферативную базу данных и систем цитирования Scopus.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа представлена в виде специально подготовленной рукописи и оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Диссертация изложена на 185 страницах машинописного текста и состоит из введения, шести глав, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и списка иллюстративного материала. Список литературы представлен 128 источниками, из которых 109 в зарубежных изданиях. Полученные результаты проиллюстрированы с помощью 16 таблиц и 26 рисунков.

Личный вклад автора

Автором самостоятельно выбрана тема диссертационного исследования, разработан дизайн и осуществлено планирование всех этапов работы. Автор лично провёл УЗИ лёгких у всех включённых в исследование пациентов, собрал клинический и инструментальный материал, выполнил статистическую обработку и интерпретацию полученных данных. Личный вклад автора заключается в разработке и внедрении в клиническую практику своего отделения оригинального 12-зонного протокола УЗИ лёгких, предусматривающего независимую количественную оценку всех ключевых ультразвуковых синдромов, а также алгоритма персонализированной интенсивной терапии патологических синдромов

в лёгких на основе данных УЗИ, пилотной прогностической модели «LUCN-D» на основе ансамблевого алгоритма машинного обучения Random Forest. Автор принимал непосредственное участие в лечении всех пациентов, включённых в исследование, в том числе в проведении анестезиологического и перфузиологического обеспечения и ведении послеоперационного периода. Все положения, выносимые на защиту, сформулированы лично автором. Результаты исследования опубликованы в научных работах, написанных лично автором.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ИССЛЕДОВАНИИ ЛЁГКИХ У ДЕТЕЙ В ОТДЕЛЕНИИ АНЕСТЕЗИОЛОГИИ И РЕАНИМАЦИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Настоящий обзор литературы посвящен анализу современных данных по ультразвуковой диагностике патологических процессов в лёгких у детей, с особым акцентом на пациентов после кардиохирургических вмешательств. Целью обзора являлось оценить диагностические возможности и эффективность метода УЗИ лёгких у детей в отделении анестезиологии и реанимации и объединить, систематизировать и проанализировать информацию об использовании ультразвукового сканирования лёгких как метода прикроватной диагностики в детской кардиохирургии. Это позволило выявить существующие пробелы в научной литературе и обосновать методологическую основу для проведения собственного исследования, включая выбор диагностических критериев, протоколов сканирования и подходов к интерпретации результатов.

Для всестороннего анализа степени разработанности темы исследования были написаны и опубликованы две обзорные статьи, посвященные методике и семиотике УЗИ лёгких у детей в отделении анестезиологии и реанимации [17] и особенности применения УЗИ лёгких в отделении анестезиологии-реанимации детского кардиохирургического профиля [15].

Был выполнен поиск релевантных статей в базах данных Pubmed и Google Scholar, по ключевым словам: «lung ultrasound», «children», «pediatric» и в базе данных E-library по ключевым словам: «ультразвуковое исследование лёгких», «УЗИ лёгких», «дети». Также анализировались статьи, предлагавшиеся базами данных как «похожие» или «similar». Для поиска отдельных ультразвуковых синдромов использовались соответствующие ключевые слова: пневмоторакс, плевральный выпот, респираторный дистресс синдром, интерстициальный синдром, альвеолярная консолидация, диафрагма. Для демонстрации ультразвуковой картины патологического процесса использованы ультразвуковые сканы из базы данных авторов, полученные с помощью УЗ-сканера Philips CX50

(Philips, Нидерланды). По некоторым спорным положениям авторы выражали собственную позицию, основанную на опыте многолетнего использования метода у детской кардиохирургической категории пациентов [6].

Для поиска статей, в которых описано применение УЗИ лёгких у пациентов детского кардиохирургического профиля, был написан систематический обзор, выполненный в соответствии с протоколами PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [15]. Был выполнен поиск статей, опубликованных на английском языке с 1 сентября 2013 г. по 1 сентября 2023 г. в базах данных PubMed, Google scholar, и на русском языке с 1 сентября 2013 г. по 1 сентября 2023 г. в E-library. Затем оценивалось соответствие полного текста статей критериям включения. Поисковый запрос включал слова на английском языке: «lung ultrasound», «children», «cardiac surgery», «respiratory failure»; на русском языке: «ультразвуковое исследование лёгких» или «узи лёгких», «дети», «кардиохирургия», «дыхательная недостаточность».

Оценка соответствия работ критериям включения проводилась в три этапа: на основе заголовка, на основе аннотации и на основе полного текста статьи.

Критерии включения в обзор:

- 1) оригинальные исследования, клинические случаи;
- 2) исследования, включающие оценку метода УЗИ лёгких;
- 3) только детский кардиохирургический профиль пациентов;
- 4) полнотекстовые статьи не старше 2013 года.

Критерии исключения в обзор:

- 1) обзорные статьи, только абстракты, неполные тексты, тезисы;
- 2) исследования, не включающие УЗИ лёгких;
- 3) присутствие взрослых пациентов в выборке.

При поиске на английском языке найдено в Google scholar 443 статьи, в PubMed 85 статей. Всего на английском языке найдено 528 статей, из которых 494 исключены после просмотра заголовка или аннотации. На предмет включения рассмотрены полные тексты 34 статей. Из них 20 статей соответствовали как минимум одному критерию исключения. В итоге осталось 14 статей для

детального изучения.

На русском языке в базе E-library было найдено 83 потенциально релевантных исследования, среди которых не было ни одной статьи, соответствующей критериям включения. В связи с этим был проведен дополнительный поиск на русском языке в реферативной базе Google scholar с ключевыми словами «узи», «легкие», «дети», «кардиохирургия». Было дополнительно найдено 814 статей, из которых ни одна не соответствовала критериям включения. Всего на русском языке было найдено 897 статей, из которых не было ни одной подходящей для систематизированного обзора (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Отбор исследований для систематического обзора в соответствии с рекомендациями PRISMA Checklist (схема)

Данный обзор литературы является компиляцией двух вышеописанных исследований [6, 15].

1.1 Методика ультразвукового исследования лёгких

Методика проведения исследования у детей несколько отличается от взрослых.

В связи с неглубоким уровнем залегания большинства интересующих структур, а также в связи с потребностью получения качественного изображения, рекомендуется проводить исследование с применением линейного ультразвукового датчика с частотой от 10 МГц и выше [79].

Глубина сканирования устанавливается между 3–5 сантиметрами, что является наиболее практичным для обнаружения ультразвуковых признаков поражений лёгких и плевральных полостей у детей [121, 122].

Описано множество авторских методик и их модификаций. Глобально можно выделить два, на наш взгляд, основных подхода к проведению УЗИ лёгких: по методике BLUE-протокола [54] и по более расширенной методике подробного анализа 12 отделов лёгких.

BLUE-протокол основан на быстром последовательном анализе 8 точек над поверхностью обоих лёгких (по 4 точки с каждой стороны) для исключения основных жизнеугрожающих состояний. Анализу подвергается ультразвуковая картина передних отделов лёгких в верхней и нижней точках с каждой стороны (между парастернальной и передней подмышечной линиями, метка датчика направлена краниально). Исключается пневмоторакс и интерстициальный синдром. Боковая точка сканирования располагается по среднеподмышечной линии на уровне диафрагмы, положение датчика несколько диагональное метка направлена краниально, производится поиск плеврального выпота. Задняя точка располагается между задней подмышечной и паравerteбральной линиями, максимально медиально, насколько это возможно, при небольшом повороте пациента на бок. В данной зоне ведется поиск альвеолярных консолидаций [54].

Данная схема проведения УЗИ очень удобна при развитии жизнеугрожающих состояний, когда предполагаемый патологический процесс в лёгких настолько серьезен и глобален, что нет смысла проводить детальный поиск по всем межреберным промежуткам. Достаточно поставить датчик в стандартных точках, не тратя дополнительное время, однако при данном подходе некоторые менее крупные патологические процессы могут быть пропущены.

Для исключения менее массивных и очевидных причин острой дыхательной недостаточности следует проводить сканирование лёгких по всем отделам. При проведении расширенного УЗИ лёгких каждую половину грудной клетки принято условно разделять на 3 области: это передняя область – от парастернальной до передней подмышечной линии, боковая – от передней подмышечной до задней подмышечной линии и задняя – от задней подмышечной до паравертебральной линии. В каждой из этих областей принято выделять верхнюю и нижнюю половину (суммарно 6 участков сканирования с каждой стороны). Выполнять исследование можно как с продольным положением датчика относительно межреберного промежутка, когда метка направлена в сторону плеча, так и с поперечным положением датчика с меткой, ориентированной в краниальном направлении. Производится сканирование каждого из 12 отделов лёгких по всем межреберным промежуткам. Легкие анализируют на предмет пневмоторакса, ателектазов, плеврального выпота, пневмонии и выполняется количественный или процентный подсчет В-линий как проявления интерстициального синдрома [70].

Стандартизированная балльная система оценки УЗИ лёгких у детей, в том числе кардиохирургического профиля, отсутствует. Так, некоторые авторы описывали балльную систему оценки только одного из ультразвуковых синдромов. Rodríguez-Fanjul J. и соавт. предложили оценивать выраженность интерстициального синдрома по количеству В-линий в межреберном промежутке [120]. Kaskinen A. K. и соавт. предлагали оценивать его выраженность по отношению В-линий ко всему межреберному промежутку в процентах [26]. При этом оценка остальных синдромов авторами не производилась [26, 120], что является большим ограничением предложенных систем ультразвуковой оценки. Другие авторы предложили смешанную систему балльной оценки ультразвуковых синдромов, при которой < 3 В-линий в межреберном промежутке соответствует 0 баллов, множественные отдельные В-линии с расстоянием ≤ 7 мм оцениваются в 1 балл, сливающиеся В-линии с расстоянием между ними ≤ 3 мм – 2 балла и консолидация лёгочной ткани с динамической бронхограммой – 3 балла [77].

Такая система оценки также имеет значительные ограничения, в первую очередь связанные с различиями в патогенезе интерстициального синдрома и синдрома альвеолярной консолидации, при которых решение объединить данные синдромы в одну балльную систему довольно спорно. Кроме того, при такой системе оценки исчезает значимость выраженности синдрома альвеолярной консолидации в зоне легкого: при наличии как незначительной по размеру консолидации, так и альвеолярной консолидации, поражающую всю зону легкого, будет выставляться 3 балла. Также возникает вопрос почему в данной системе оценки выставляется 3 балла только когда консолидация сопровождается динамической воздушной бронхограммой (бронхиолы частично проходимы для воздуха), при этом не совсем ясно как оценивать синдром альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм или со статическими воздушными бронхограммами. Подобная смешанная система оценки выраженности ультразвуковых синдромов описана в публикации [34].

Наиболее детальная балльная система оценки была опубликована Song и соавт. Данная система была основана на 12-зонном ультразвуковом протоколе, в каждой зоне лёгких оценивались три компонента – консолидации, В-линии и плевральный выпот, по отдельной шкале от 0 до 3 баллов [124]. В данной системе оценки имеются ограничения: альвеолярные консолидации классифицируются как 0 баллов – консолидации нет, 1 балл – субплевральная консолидация, 2 балла – консолидация небольшого размера, 3 балла – консолидация большого размера, при этом конкретных и четких критериев того или иного размера нет, характер оценки выраженности альвеолярных консолидаций чрезмерно субъективен, также нет отдельного балла для консолидации, охватывающей всю зону легкого, хотя такая выраженность синдрома альвеолярной консолидации является максимальной и сильнее влияет на клиническую картину. Кроме того, в таких балльных системах оценки не учитываются другие ультразвуковые синдромы: тип воздушных бронхограмм в структуре альвеолярных консолидаций, выраженность локального В+ синдрома, гидроторакс, пневмоторакс и аномальные движения диафрагмы.

Таким образом, отсутствует стандартизированный подход к оценке ультразвуковой картины лёгких у детей грудного возраста после кардиохирургических вмешательств. Предложенные в литературе алгоритмы проведения УЗИ лёгких не включают в себя комплексное исследование всех ультразвуковых синдромов либо объединяют разнородные патофизиологические синдромы в единую балльную шкалу, что существенно снижает прогностическую и диагностическую ценность УЗИ лёгких.

1.2 Нормальная ультразвуковая картина лёгких

Для всех отделов грудной клетки, за исключением проекции сердца, характерно одинаковое ультразвуковое изображение структур грудной стенки, плевры и лёгких (Рисунок 2). Под эхогенным слоем подкожной жировой клетчатки располагается четкий гипозоногенный мышечный слой. При поперечном сканировании, четко определяются гиперэхогенные дугообразные образования – ребра, под которыми находятся анэхогенные акустические тени. Хрящевая часть ребра определяется как гипозоногенное однородное овалообразное образование. Межреберья представлены эхоструктурой межреберных мышц [53].

Под внутренней поверхностью межреберных мышц лоцируется четкая, тонкая, ровная гиперэхогенная линия, которая, в норме, всегда подвижна при дыхании. Она является ультразвуковым феноменом, который возникает при отражении ультразвуковых лучей на границе с воздухом в субплевральных альвеолах, в англоязычной литературе данная гиперэхогенная линия называется «плевральной линией» [54, 121, 122] и, по своей сути, является ультразвуковым артефактом. При поперечном межреберном промежутком положении датчика, плевральная линия видна фрагментарно, ограничивается акустическими тенями от ребер, а при продольном положении датчика, видна на всем протяжении. Как описано выше, плевральная линия смещается при дыхании, такое смещение, в литературе, называется «скольжение легкого» [54, 121, 122].

Глубже плевральной линии в норме имеются горизонтальные гиперэхогенные А-линии, являющиеся артефактами – реверберациями, возникающими из-за многократного переотражения луча между датчиком и воздушного легкого, так как воздух абсолютно непроницаем для ультразвука. А-линии являются обязательным критерием нормальности легкого [121, 122].

Помимо горизонтальных артефактов – А-линий, по мнению ряда авторов, в нормальном легком, в том числе новорожденного, могут присутствовать единичные В-линии (не более 3) [13, 38, 54, 55, 73, 109]. По мнению же других авторов, В-линии всегда являются признаком интерстициального синдрома [122]. Примечательно, что в одном из проведенных исследований отмечалось, что у всех новорожденных детей, участвующих в исследовании, даже без признаков поражения лёгких, наблюдался интерстициальный синдром той или иной степени выраженности [38].

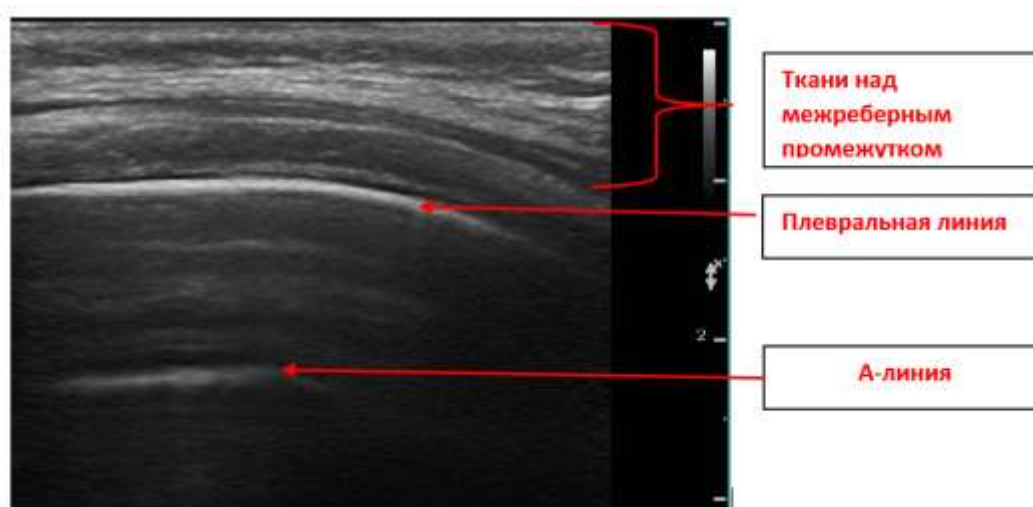


Рисунок 2 – Нормальная ультразвуковая картина легкого

В-линии определяются как вертикальные гиперэхогенные вертикальные лазероподобные артефакты, которые возникают из плевральной линии «хвосты комет», простираются до нижней части экрана без затухания и движутся синхронно со скольжением лёгких [53, 109].

Важно учитывать место возникновения вертикальных артефактов для

понимания источника ревербераций хвоста комет. Для интерстициального синдрома характерно появление В-линий, исходящих непосредственно от плевральной линии в то время, как при появлении вертикальных артефактов от мягких тканей грудной стенки свидетельствуют о наличии незначительного воздуха при их эмфиземе [50].

Нормальное легкое на визуализации в М-режиме имеет «признак морского берега». Гиперэхогенная плевральная линия разделяет изображение на неподвижную часть, представленную горизонтальными линиями («морские волны»), и часть ниже, которая выглядит зернистой («песок»), поскольку над этой областью отражается нормальное движение легкого вперед и назад [79].

1.3 Диффузный интерстициальный синдром

Отек лёгких – это аномальное увеличение внесосудистой воды в лёгких, вследствие повышения гидростатического давления в малом круге кровообращения в результате застойной сердечной недостаточности или внутрисосудистой объемной перегрузки.

Рентгенография грудной клетки традиционно была предпочтительным методом визуализации для оценки застоя в лёгких [20, 45]. Однако интерпретация характерных рентгенологических признаков, таких как усиление легочного рисунка и интерстициальный отек, часто является субъективной из-за разного уровня знаний и высокой вариабельности результатов между наблюдателями [45].

Имеются данные, что УЗИ лёгких дает более объективные результаты за счет оценки вертикальных гиперэхогенных артефактов – В-линий [45, 53] (см. Рисунок 2). Чувствительность УЗИ лёгких выше стандартной рентгенографии в определении интерстициального синдрома [72, 128].

Появление В-линий вызвано уменьшением соотношения альвеолярного воздуха и внесосудистой жидкости в лёгких и связаны с множественными акустическими реверберациями между небольшими богатыми водой структурами и альвеолярным воздухом [45]. Многие исследования показали тесную

корреляцию между интерстициальным поражением лёгких и В-линиями – чем больше В-линий, тем более выражен интерстициальный синдром [40, 52, 53, 72]. Если В-линии четко разграничены и не сливаются, состояние называется интерстициальным синдромом (интерстициальный отек), если же происходит их слияние на ультразвуковом скане, это носит название альвеолярно-интерстициального синдрома и свидетельствует об еще более низком соотношении воздух/жидкость [121].

В другом исследовании изучали точность УЗИ лёгких при количественном определении воды в лёгких у пациентов в критическом состоянии с использованием количественной компьютерной томографии (КТ) в качестве золотого стандарта. В-линии, по данным УЗИ, коррелировали с массой и плотностью лёгких, определенными с помощью КТ. Было показано, что УЗИ лёгких может обеспечить надежное, простое и безрадиационное исследование лёгких в условиях интенсивной терапии [52].

При дифференцировке диффузного интерстициального синдрома у взрослой когорты пациентов, глобально, выделяют 2 причины – кардиогенный отек лёгких и не кардиогенный отек [52]. УЗИ-картина при острой дыхательной недостаточности кардиогенного генеза характеризуется наличием симметричных двухсторонних множественных В-линий на фоне неизменной плевральной линии [101], что было показано в том числе в крупном мета-анализе, включившем 17 893 пациента с подозрением на острую сердечную недостаточность, показавшем высокую чувствительность метода [37]. Однако публикаций с подобной классификацией и анализом интерстициального синдрома у пациентов детского возраста найдено не было.

У пациентов с ОРДС, выявление множественных В-линий, позволяет выявить внесосудистое накопление жидкости в лёгких, своевременно уменьшить или прекратить инфузионную нагрузку и тем самым оптимизировать терапию [44, 111] (Рисунок 3).

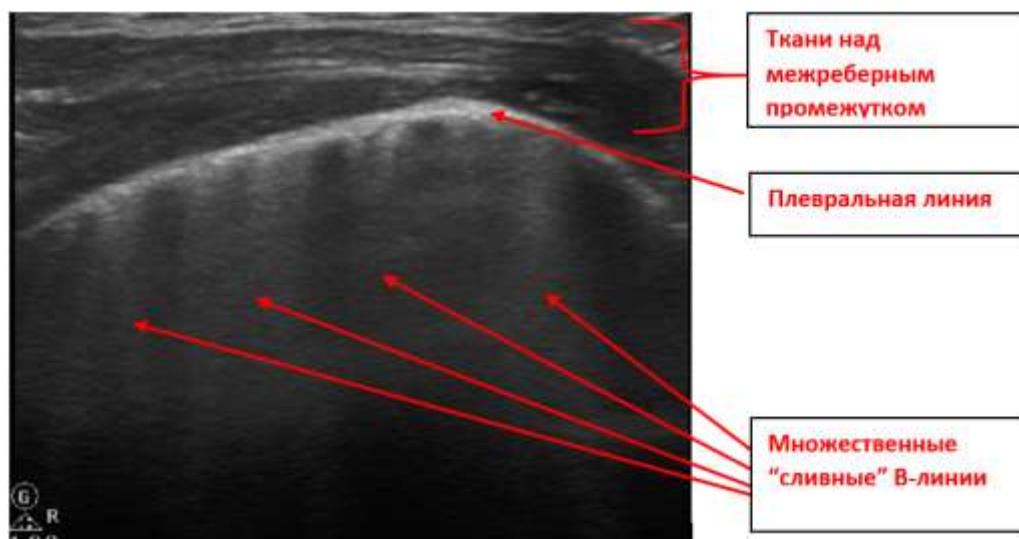


Рисунок 3 – Интерстициальный синдром

УЗИ лёгких и интерстициальный синдром в детской кардиохирургии

Три статьи были посвящены УЗИ интерстициального синдрома у детей с ВПС.

В исследовании Kaskinen A. K. и соавт. изучалась возможность использования УЗИ лёгких по шести зонам для оценки внесосудистой воды лёгких у детей после кардиохирургических вмешательств.

Шестьдесят один ребенок (в возрасте от 3 дней до 7,4 года), был включен в исследование. Авторы оценивали корреляцию количества В-линий с объемом внесосудистой жидкости лёгких, с данными рентгенографии органов грудной клетки в прямой проекции, со статическим комплаенсом, с послеоперационным балансом жидкости, с комплексной оценкой сложности коррекции ВПС по шкале Аристотеля, с продолжительностью искусственного кровообращения (ИК), а также с краткосрочным клиническим результатом по следующим критериям: продолжительность искусственной вентиляции лёгких (ИВЛ), продолжительность пребывания в отделении реанимации и интенсивной терапии, отсроченное сведение грудины.

Оценка В-линий осуществлялась следующим образом: 1 балл – В-линий < 25 % от межреберного промежутка, 2 балла – 25–50 % В-линий,

3 балла – 50–75 % В-линий, 4 балла – > 75 % В-линий. Оценка рентгенограммы лёгких в прямой проекции проводилась опытным рентгенологом. Результаты показали, что показатели В-линий по данным УЗИ и рентгенологическая картина лёгких коррелируют с продолжительностью искусственного кровообращения (ИК) и пережатия аорты, возрастом пациента, комплексной оценкой сложности коррекции ВПС по шкале Аристотеля, а также с продолжительностью ИВЛ и продолжительностью пребывания в отделении интенсивной терапии.

Авторы отметили, что УЗИ лёгких имеет преимущества при оценке внесосудистой жидкости лёгких после хирургической коррекции ВПС у детей по ряду причин:

- 1) результаты УЗИ лёгких легко интерпретировать;
- 2) результаты УЗИ отличаются низкой вариабельностью между наблюдателями;
- 3) УЗИ можно проводить у постели больного, и результаты сразу же доступны врачу;
- 4) В-линии могут появляться рано и предшествовать рентгенологическим признакам увеличения объема внесосудистой жидкости лёгких [26].

В исследовании Mohammed A. K., и соавт., включавшем 56 детей в возрасте 1–18 мес., УЗИ лёгких проводилось в рамках анализа эффективности использования фуросемида перед индукцией анестезии у детей с хирургической резекции коарктации аорты. После индукции анестезии и в конце операции выполнялась оценка В-линий в 12 зонах лёгких с отображением результатов в баллах по шкале от 0 до 36. Врач, проводивший исследование, не знал, к какой группе принадлежит пациент. При сравнении показателей сонографии в начале и конце операции было обнаружено, что количество баллов в конце операции (УЗИ 2) было больше, чем после индукции анестезии (УЗИ 1), что было вызвано развитием отека и/или консолидаций. Также, несмотря на то, что УЗИ 2 было выше, чем УЗИ 1 в обеих группах, УЗИ 2 было значительно меньше в группе с использованием фуросемида перед индукцией анестезии, чем в группе контроля,

что указывает на менее выраженное развитие отека и консолидаций лёгких после выполнения оперативного вмешательства. Результаты ультразвукового сканирования лёгких были подтверждены рентгенографией грудной клетки при поступлении в отделение интенсивной терапии [77].

Rodríguez-Fanjul J. и соавт. было выполнено УЗИ лёгких 51 новорожденному с ВПС в первые дни жизни. Все пациенты были разделены на две группы в зависимости от предрасположенности к развитию гиперволемии малого круга кровообращения (МКК), оцениваемой по обилию В-линий. Результаты сравнивали с физикальным осмотром, рентгенографией грудной клетки и эхокардиографией.

Отек лёгких определялся на основании подсчета количества В-линий, где нормой считалось отсутствие В-линий, легкий отек лёгких характеризовался наличием < 3 В-линий в одном межреберном промежутке (в эту группу были включены дети с паттерном транзиторного тахипноэ новорожденных), умеренный отек лёгких – от 3 до 7 В-линий, и тяжелый отек характеризовался наличием > 7 В-линий в одном межреберном промежутке либо сливными В-линиями без сохраненных нормальных участков.

Картина УЗИ лёгких при рождении была аномальной в 86,3 % случаев, в 50 % случаев из них был диагностирован легкий отек лёгких, возникавший в первые 48 часов.

Авторы обнаружили, что новорожденные с ВПС с гиперволемией МКК имели значительное увеличение количества В-линий при ультразвуковой оценке лёгких во все анализируемые моменты времени, прежде чем это было обнаружено при рентгенологическом исследовании, при клиническом обследовании или даже при эхокардиографии.

У пациентов с умеренным или тяжелым отеком при УЗИ лёгких не наблюдалось улучшения ультразвуковой картины с течением времени, а имело место прогрессивное ухудшение показателей по сравнению с пациентами с нормальным легочным кровотоком. Авторы объясняют это тем, что при рождении сопротивление легочных сосудов все еще велико, что предотвращает гиперволемию малого круга кровообращения, но при снижении сопротивления в

первые дни жизни шунт слева направо увеличивается, что позднее приводит к клинически выраженному тахипноэ, ОДН и задержке развития.

В заключении авторы указали, что УЗИ лёгких является более полезным инструментом для оценки выраженности гиперволемии МКК у пациентов с ВПС по сравнению с традиционными исследованиями, такими как рентгенография и эхокардиография [120].

1.4 Синдром альвеолярной консолидации: пневмония, ателектаз

Данный синдром может наблюдаться при воспалительной консолидации легочной ткани – пневмонии в стадии консолидации [49, 67, 98, 102, 105, 122], ателектазе обструктивного и компрессионного генеза [84] (Рисунок 4).

Компрессионный ателектаз будет рассмотрен в разделе «плевральный выпот».

Чувствительность УЗИ метода по разным данным в диагностике синдрома альвеолярной консолидации, составляет 87,8–100 % [9, 69]. Однако все же дифференциальную диагностику патологических процессов, входящих в этот синдром, необходимо проводить опираясь на клиническую картину [82], так как патогномоничных ультразвуковых признаков, позволяющих провести точную дифференциальную диагностику альвеолярной консолидации, нет [9].

Некоторые авторы ставят под вопрос диагностическую ценность выявления небольших участков альвеолярной консолидации менее 1 квадратного сантиметра [40, 100].

В педиатрии очень актуальным является своевременная, быстрая и точная диагностика пневмоний, поскольку возможности рентгенографии в прямой проекции, в условиях реанимационного отделения, у ребенка в положении лежа, ограничены.

Рентгенография грудной клетки обычно считается стандартным методом визуализации первой линии при подозрении на пневмонию [49]. Однако рентгенография грудной клетки не может считаться золотым стандартом диагностики из-за широкой вариабельности интерпретации результатов и возможной недостаточной чувствительности и специфичности [32, 35]. Недавний

мета-анализ исследований, сравнивающих УЗИ лёгких с рентгеновским исследованием и КТ грудной клетки для диагностики пневмонии, показал хорошую чувствительность до 96 % и специфичность до 93 % у детей, включая новорожденных [64]. Мета-анализ включал восемь исследований с общим числом 795 детей и возрастом 10 дней – 5,6 года. При анализе подгрупп как эксперты, так и начинающие врачи ультразвуковой диагностики достигли высоких показателей диагностической точности с чувствительностью и специфичностью выше 90 % в обеих группах.

Более поздние исследования, в которых сравнивались УЗИ лёгких и рентгенограммы грудной клетки, показали аналогичные результаты [30, 67, 82, 83, 122].

Согласно международным рекомендациям, при подозрении на пневмонию УЗИ лёгких показало не меньшую точность чем рентгенографии грудной клетки. Эти данные свидетельствуют о том, что при наличии клинического подозрения на пневмонию, положительный результат УЗИ лёгких исключает необходимость выполнения рентгенографии грудной клетки [53].

В нескольких исследованиях изучались и сообщались причины противоречивых результатов УЗИ и рентгенографии грудной клетки в диагностике консолидаций.

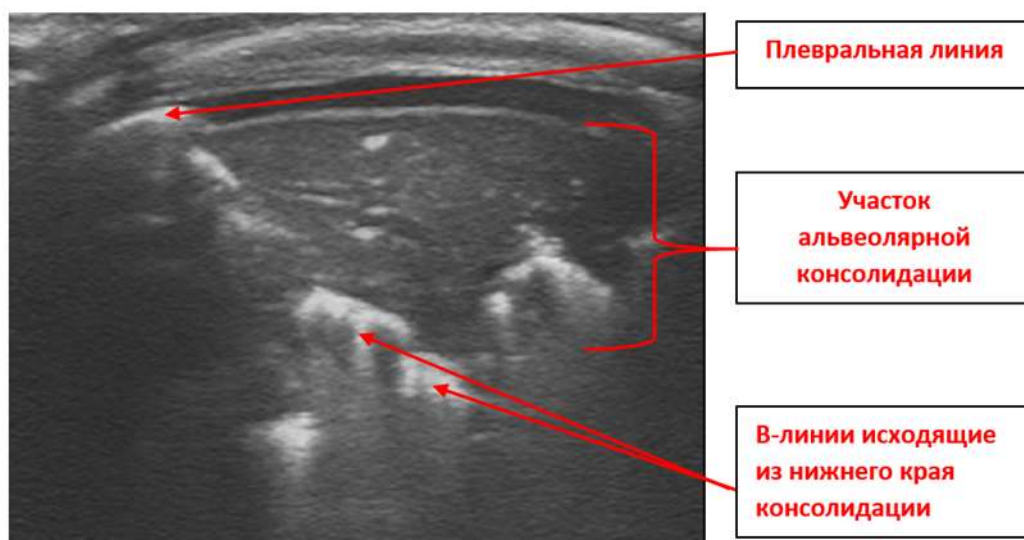


Рисунок 4 – Синдром альвеолярной консолидации

Причины положительных результатов УЗИ лёгких, но отрицательных результатов рентгенограммы грудной клетки:

- 1) высокая чувствительность УЗИ лёгких для выявления очень маленьких (субсантиметровых) уплотнений [30, 82, 83, 100];
- 2) ретрокардиальные или поддиафрагмальные консолидации, не видимые на рентгенограммах грудной клетки в прямой проекции [116, 122];
- 3) ошибочная классификация печени или селезенки как консолидация нижней доли [102].

Причины отрицательных результатов УЗИ лёгких, но положительных результатов рентгенограммы грудной клетки:

- 1) консолидации, не достигающие поверхности плевры (часто расположены в перихилярной (вокруг корней лёгких) или паракардиальной областях) [67, 82];
- 2) уплотнения, расположенные в труднодоступных для УЗИ областях лёгких, таких как подлопаточная и надключичная области [49, 122].

Различают пневмонию в стадии инфильтрации, которая проявляется локальным наличием большого количества, иногда сливных, В-линий без зон консолидации [49, 79, 83] и пневмонию в стадии консолидации [83].

Как в исследованиях со взрослой категорией пациентов, так и в исследованиях с детьми, существует мнение о том, что локальный интерстициальный паттерн (локальный В+ синдром) представляет собой пневмонию вирусной этиологии [100, 112]. Так же следует отметить, что локальные сливные В-линии не являются патогномичным признаком пневмонии, а могут выражать неспецифическое интерстициальное поражение [49].

Инфекционные и воспалительные процессы могут привести к вытеснению жидкостью альвеолярного воздуха. Когда процесс консолидации воздушного пространства распространяется на плевру, его можно визуализировать при УЗИ, обычно как нечетко очерченную гипоэхогенную субплевральную область с рядом сопутствующих особенностей, наличие которых вариабельно:

- 1) потеря эхогенности плевральной линии над областью консолидации и отсутствие А-линий внутри этой области [67, 79, 102, 122];
- 2) усиление В-линий, окружающих область консолидации [102, 122];
- 3) обилие В-линии часто возникают из глубокого края консолидации, а не из плевры [102, 122];
- 4) воздушные бронхограммы, визуализируемые как множественные гиперэхогенные точечные или двояковыпуклые яркие включения в области альвеолярной консолидации или ветвящиеся древовидные структуры в зависимости от плоскости, в которой они разрезаются ультразвуковым лучом [49, 122]. Разделяют статические (не изменяющиеся при дыхании) и динамические (происходят изменения в структуре воздушной бронхограммы, связанные с движением воздуха по бронхам) воздушные бронхограммы;
- 5) жидкостные бронхограммы: возникают, когда жидкость заполняет бронхиолы, имеет вид более гипозоногенной области внутри консолидации трубчатой формы. Является довольно редким ультразвуковым признаком [49, 122];
- 6) сосудистый Рисунок по цветовому доплеровскому картированию внутри консолидации [49, 122].

Консолидации имеют характерный внешний вид, напоминающий печень, что называется «гепатизацией легкого» [49, 67, 79, 102, 105, 109, 122].

Следует отметить, что УЗИ не позволяет достоверно дифференцировать ателектаз от пневмонии [49, 79, 95] и нужно дополнительно опираться на клиническую картину и данные лабораторных и инструментальных методов обследования.

В основном считается, что наличие воздушных бронхограмм [49, 55, 83, 122], особенно динамических [65] и гиперваскуляризация в зоне консолидации [49, 83, 122], а также наличие плеврального выпота со стороны консолидации [79] являются наиболее весомыми косвенными признаками, увеличивающим вероятность пневмонии в дифференциальной диагностике с ателектазом. Отмечается, что чаще всего воздушная бронхограмма при ателектазах имеет

параллельный ход и скучена, статична. При пневмонии же воздушная бронхограмма чаще имеет ветвящийся, древовидный характер [49]. Кроме того, рядом авторов считается, что наличие динамической воздушной бронхограммы позволяет исключить ателектаз [49, 65, 79], но не у новорожденных, так как в 16,7 % случаев, динамическая бронхограмма наблюдается и при ателектазе [79].

«Легочный пульс» чаще всего присутствует при ателектазах большего размера. Это выглядит как дрожание легкого, создаваемое бьющимся сердцем, при котором удары передаются через ателектазированное легкое к плевре, однако легочный пульс имеется и у 50 % больных пневмонией [79].

Распределение УЗ-признаков при пневмонии у детей:

- признак хвоста кометы (В-линии) при пневмонии выявлялись в 44,0–50,9 % случаев [49, 122];
- воздушные бронхограммы в 70,0–93,7 % случаев [49, 122];
- жидкостные бронхограммы в 20,1 % случаев [122];
- наличие плеврального выпота отмечалось в 28,9–53,0 % случаев [49, 67, 122].

УЗИ лёгких и ателектазы в детской кардиохирургии

1 статья была посвящена УЗИ лёгких при ателектазах.

Wu L. и соавт. было проведено исследование с целью определить наиболее показательный участок лёгких для оценки ателектазов у детей с хирургической коррекцией ВПС в условиях общей анестезии, а также оценить влияние ИВЛ с контролем по давлению и положительным давлением в конце выдоха (ПДКВ) на аэрацию лёгких.

В исследование были включены пациенты от 3 месяцев до 3 лет с ВПС, которым была запланирована операция в условиях общей анестезии. 40 детей были случайным образом распределены в группу с ИВЛ с ПДКВ +5 см H₂O, либо в контрольную группу со стандартной терапией без ПДКВ. Предоперационное УЗИ лёгких проводилось каждому ребенку дважды: через 1 и 15 минут ИВЛ. Частота встречаемости ателектазов составила 82,5 % через 1 минуту после искусственной вентиляции лёгких, а частота встречаемости ателектазов в

одинаковых зонах сканирования не различалась между группами. Однако частота возникновения ателектазов на ультразвуковых сканах в задненижних отделах лёгких (в пятом, шестом и седьмом межреберьях по задней подмышечной линии) была намного выше, чем в передних отделах, где ателектазов почти не было обнаружено.

Искусственная вентиляция лёгких с контролем по давлению и ПДКВ +5 см H₂O через 15 минут значительно снизила частоту возникновения ателектазов, а ИВЛ с контролем по давлению без ПДКВ не влияла на динамику ателектазов в одинаковых зонах сканирования через 15 минут по сравнению со сканами, полученными через 1 минуту после ее начала.

Отмечается, что до лечения ателектазированные области в левом легком были больше, чем в правом, как в группе с ПДКВ, так и в контрольной группе.

Частота встречаемости ателектазов в задненижних отделах была значительно выше, чем в передних и переднелатеральных отделах. Таким образом, выбор зоны ультразвукового сканирования может повлиять на выявление ателектаза и оценку применения ПДКВ.

Периоперационное УЗИ лёгких показало, что давление ПДКВ +5 см H₂O полезно для реаэрации лёгких и уменьшения ателектаза [76].

1.5 Пневмоторакс

Метод УЗИ лёгких и плевральных полостей имеет большую чувствительность при диагностике пневмоторакса как у взрослых, так и у детей [53, 65, 86, 126] (Рисунок 5).

Как упоминалось ранее, УЗИ здорового легкого выявляет симптомы «скольжение лёгких» и «симптом морского берега» в В- и М-режимах соответственно (Рисунок 6).



Рисунок 5 – Схема-алгоритм ультразвуковой диагностики пневмоторакса

1) В случаях пневмоторакса, наличие воздуха между висцеральной и париетальной плеврой устраняет скольжение лёгких при визуализации в В-режиме [53, 79, 98, 121]. Чувствительность и специфичность этого признака составляли около 95 % и 90 % соответственно [53, 79, 98]. На этом фоне часто визуализируются множественные, компактно расположенные А-линии.

2) Визуализация в М-режиме при пневмотораксе выявляет «признак штрих-кода» [53, 71, 98, 117]. Чувствительность этого признака достигает 100 % [71] (Рисунок 7).

3) При пневмотораксе В-линии не видны, поскольку они происходят из висцеральной плевры [53, 121]. При наличии В-линий можно почти на 100 % исключить пневмоторакс [117].

4) Еще одним хорошо описанным признаком является «точка легкого». Она представляет собой переходную зону между нормальным (скольжение лёгких) и аномальным (без скольжения лёгких) паттерном [53, 71, 117, 121]. Чувствительность достигает 92,3 % [71].

5) При пневмотораксе характерно обязательное отсутствие легочного пульса [53, 98].

В международных рекомендациях было показано, что УЗИ лёгких более точно исключает диагноз пневмоторакса, чем рентгенография грудной клетки в прямой проекции в положении лежа на спине, и что первоочередное

использование УЗИ лёгких может быть лучшей диагностической стратегией при подозрении на пневмоторакс. Также было показано, что УЗИ лёгких сравнимо с компьютерной томографией при оценке пневмоторакса [53].

Отмечено, что с помощью УЗИ можно также оценить его объем. Небольшой – если точка легкого определяется на передней поверхности грудной клетки между парастернальной и передней подмышечной линией, большой – если точка легкого находится уже на боковой поверхности грудной клетки [71].

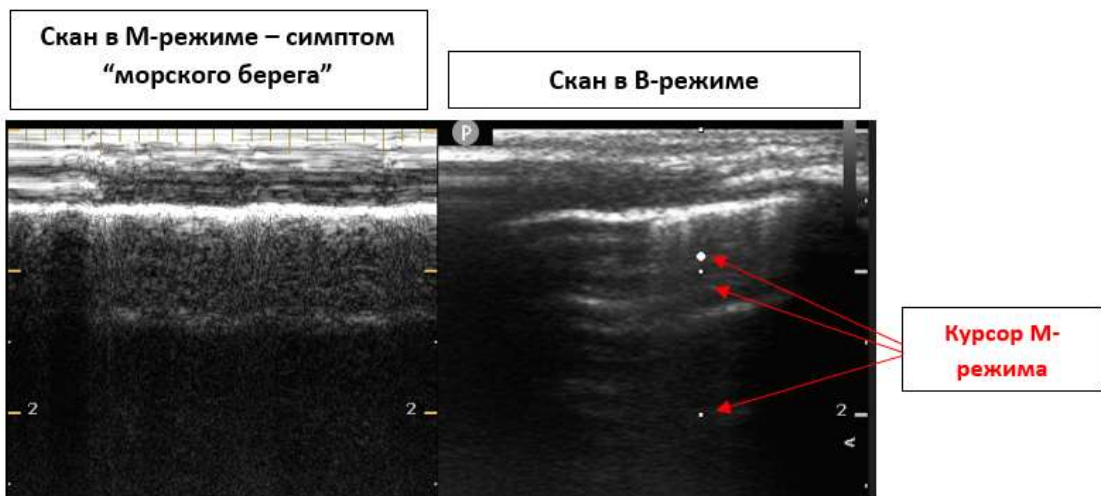


Рисунок 6 – Симптом «морского берега» в М-режиме
(Нормальный участок легкого)



Рисунок 7 – Пневмоторакс. Признак «штрих-кода» в М-режиме

УЗИ лёгких и пневмоторакс в детской кардиохирургии

В статье Polito A., и соавт. был описан клинический случай успешной ургентной диагностики пневмоторакса по время проведения сердечно-легочной реанимации у новорожденного ребенка с коарктацией аорты и дефектом межжелудочковой перегородки после резекции коарктации и суживания ствола легочной артерии.

Ультразвуковое исследование было выполнено менее чем за 10 секунд и были выявлены следующие признаки левостороннего пневмоторакса:

- 1) отсутствие скольжения легкого в В-режиме;
- 2) отсутствие В-линий;
- 3) «штрих- код» в М-режиме;
- 4) была найдена точка легкого.

Дежурным хирургом было проведено экстренное дренирование левой плевральной полости. Восстановление сердечной деятельности было достигнуто примерно через 30 минут после начала сердечно-легочной реанимации. Рентгенография грудной клетки, полученная непосредственно перед установкой плеврального дренажа, подтвердила наличие массивного левостороннего пневмоторакса [86].

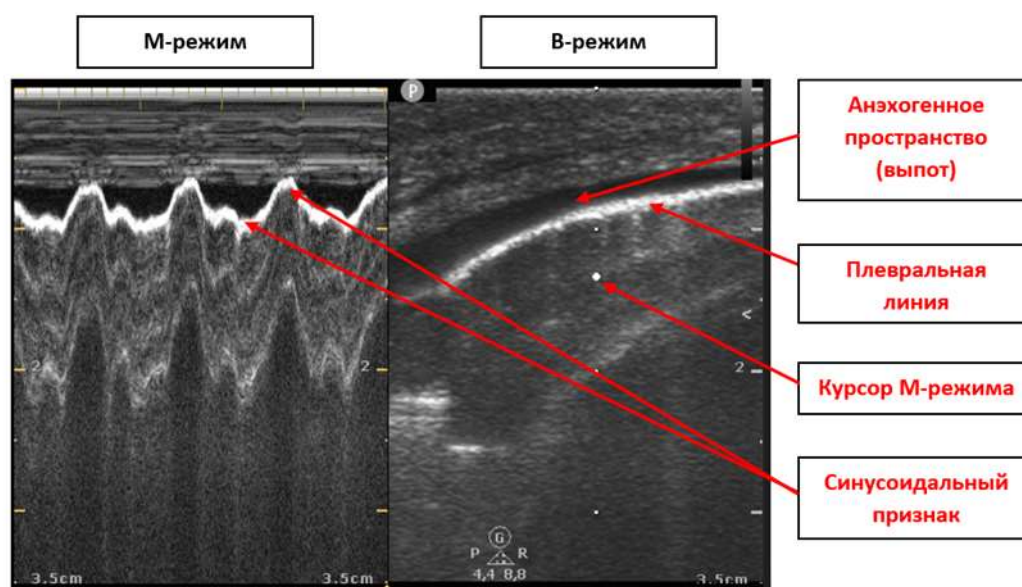
1.6 Плевральный выпот

Появление жидкости в плевральной полости новорожденного подчиняется тем же правилам, что описаны в литературе для взрослых [79]:

- 1) жидкость анэхогенная (черная) и скапливается в наиболее отлогих участках под силой гравитации [19, 79, 98, 121]. Накапливаясь, выпот вызывает коллабирование участка легкого с формированием компрессионного ателектаза (синдром альвеолярной консолидации), который «флотирует» в объеме выпота, визуально напоминая медузу – так называемый «симптом медузы» [121]. Такой участок альвеолярной консолидации часто имеет внутри воздушные бронхограммы [56];

2) в М-режиме с каждым дыхательным циклом линия поверхности лёгких будет перемещаться к линии плевры, создавая особый «знак синусоиды» – синусоидальный признак [49, 79, 121] (Рисунок 8);

3) другим частым признаком является движение аэрированного легкого над плевральным выпотом во время вдоха. Это так называемый «знак занавеса» [79].



Примечание: В-режим– анэхогенное пространство между висцеральной и париетальной плеврой. М-режим – синусоидальный признак.

Рисунок 8 – Признаки гидроторакса

Помимо всего прочего, УЗИ позволяет различать транссудат и экссудат на основании отсутствия или присутствия эхогенных клеточных элементов (эхо-взвесь) [79, 84].

Для подсчета объема выпота предложено множество формул, большинство из которых не модифицированы под детей. Нами используется модифицированная формула Balik, так как в одном из отечественных исследованиях было обнаружена наибольшая точность измерения [19], что подтверждается на нашей практике (Рисунок 9).

$$V_{\text{выпота}} = 20 \times X / k$$

X – перпендикулярное расстояние в миллиметрах от участка легкого до грудной клетки (толщина анэхогенного пространства), измеренное по задней подмышечной линии на уровне основания легкого, при положении датчика по ходу межреберья (поперечное положение).

Коэффициент $k = 1$ – при массе тела ребенка 40 кг и более (т. е. используется формула Balik без поправочных коэффициентов); 2 – при массе тела ребенка около 30 кг (около 7 – 10 лет); 3 – при массе тела ребенка около 20 кг (около 4–7 лет); 5 – при массе тела ребенка около 10 кг (около 1 год); 8 – при массе тела ребенка около 5 кг (новорожденный – 3 мес.); 10 – при массе тела ребенка около 3 кг (доношенный новорожденный); 12 – при массе тела ребенка 1–1,5 кг (недоношенный – 28–32 нед. гестации).

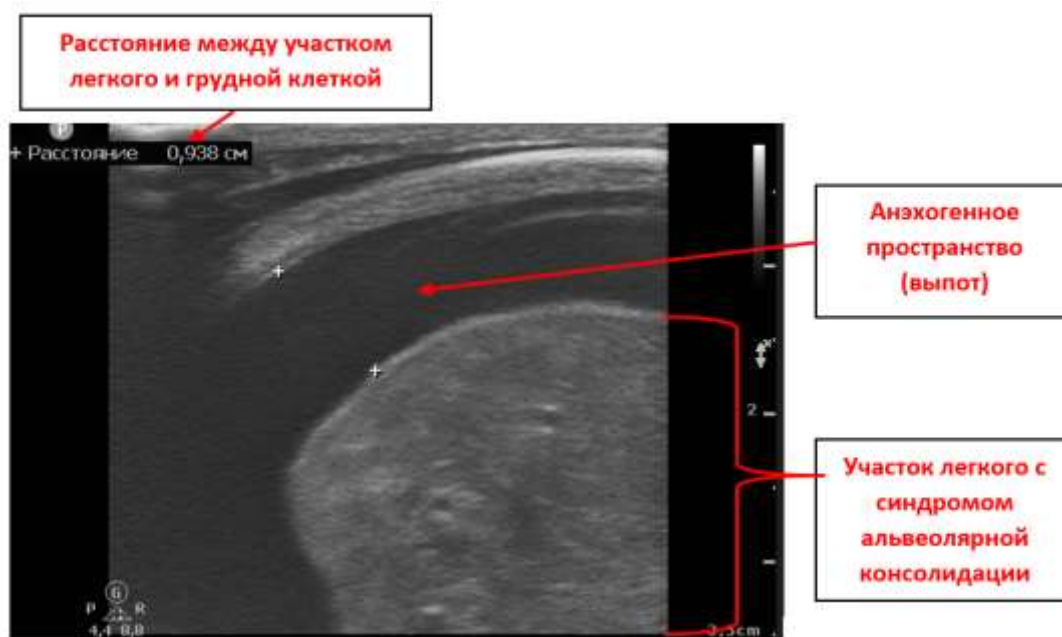


Рисунок 9 – Измерение расстояния между участком легкого и грудной клеткой для модифицированной формулы Balik

1.7 Движение диафрагмы: норма, паралич, слабость, парадоксальное движение

В исследованиях, посвященных ультразвуковой оценке диафрагмы, выделяют несколько категорий типов ее движения: нормальное, слабость или парез, паралич и парадоксальное движение [29, 87, 119].

Стандартизированной общепринятой методики ультразвуковой оценки функции диафрагмы нет.

Для оценки диафрагмы у детей используют конвексный, либо микроконвексный датчик, расположенный подмечевидно с осью сканирования в корональной (фронтальной) плоскости с меткой датчика на «9 часов» [29, 119]. Правый купол диафрагмы визуализируется почти в 100 % случаев, однако левый купол иногда закрыт для ультразвуковой визуализации воздушным пузырем желудка либо раздутыми петлями кишечника.

В таких случаях, описано второе положение датчика – перпендикулярно грудной стенке, при этом маркер направлен в положение «на 12 часов» в восьмом или девятом межреберье между передней и средней подмышечными линиями., что позволяет визуализировать левый купол диафрагмы, используя селезенку как акустическое окно [21].

От себя добавляем, что данные методы оценки диафрагмы, на наш взгляд наиболее оптимальны и повторяемы.

Первоначально сканирование производится в В-режиме, оценивается симметричность и синхронность движений правого и левого куполов. Затем, для более точной верификации, сканирование производится в М-режиме отдельно для правого и левого купола диафрагмы [21, 29, 87, 119]. Важно уточнить, что такая оценка движения диафрагмы проводится при переводе пациента на самостоятельное дыхание, без поддержки вдоха давлением.

Диафрагмальное движение категории:

- нормальное (Рисунок 10): Диафрагма движется каудально по направлению к печени или селезенке с волной сгибания в М-режиме вверх.

Экursionsия составляет ≥ 4 мм и разница между амплитудой движения куполов диафрагмы < 50 %;

- слабость (парез) диафрагмы: Движение направлено каудально. Разница между амплитудой движения куполов диафрагмы > 50 %. Экursionsия составляет < 4 мм;

- парадоксальные движения диафрагмы (Рисунок 11): Диафрагма во время вдоха смещается краниально с отклонением волны вниз в М-режиме (инвертированная волна);

- паралич диафрагмы (Рисунок 12): Ровная линия в М-режиме, движение диафрагмы отсутствует.

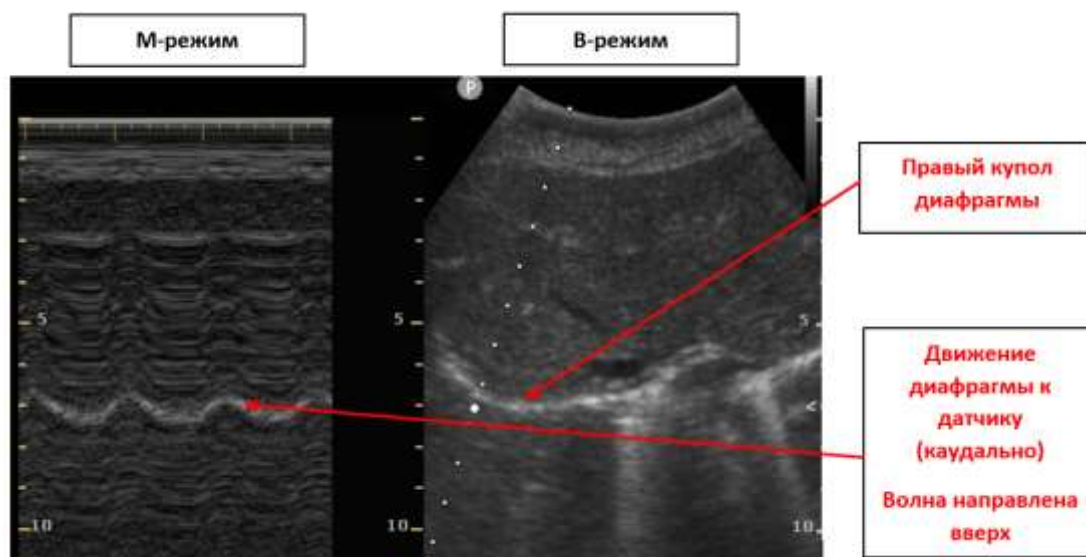


Рисунок 10 – Нормальное движение диафрагмы

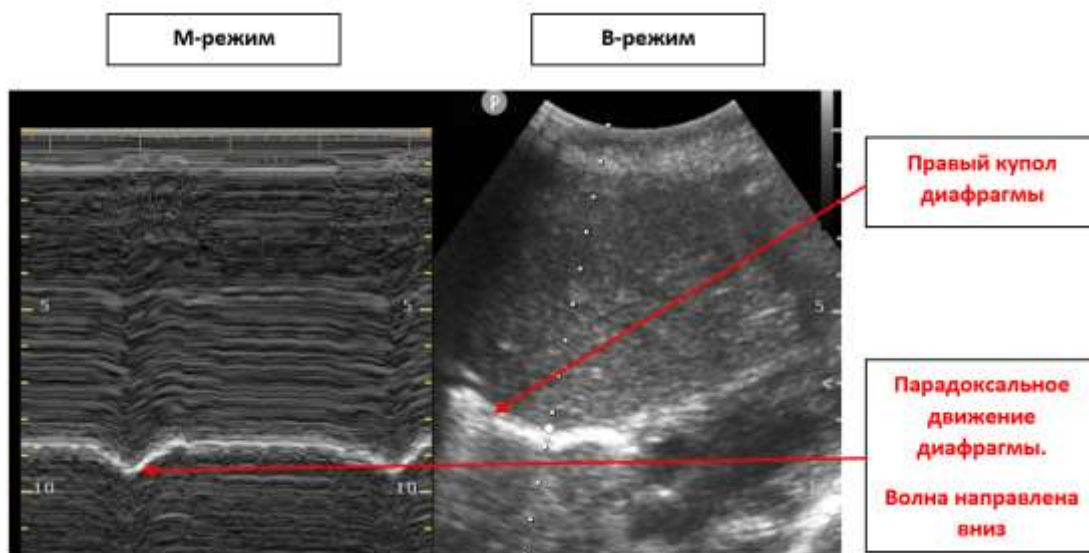


Рисунок – 11 – Парадоксальное движение диафрагмы

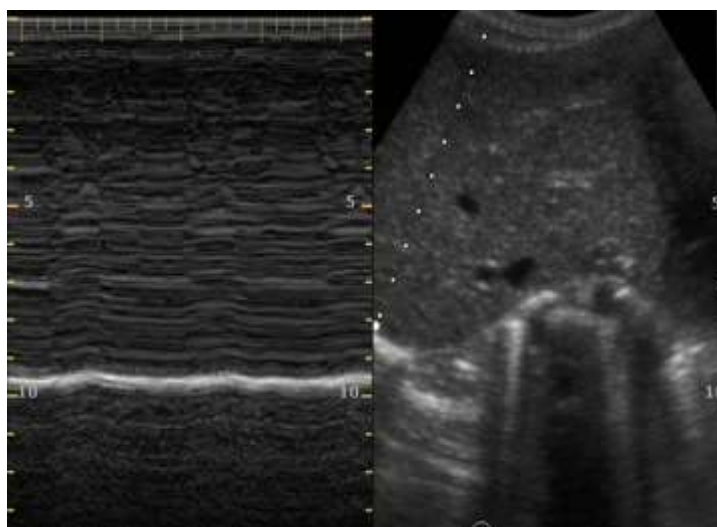


Рисунок 12 – Парез (паралич) купола диафрагмы

Предложено оценивать фракцию утолщения диафрагмы (ФУД) в том числе и детям, которых невозможно перевести на самостоятельное дыхание для подсчета амплитуды экскурсии диафрагмы [21, 25, 43, 80, 85, 89, 115]. Было показано, что ФУД не различается среди здоровых детей различных возрастных групп [114].

В одном исследовании авторами был осуществлен перевод ИВЛ во вспомогательный режим вентиляции, после чего проводилась УЗИ. Оценка функции диафрагмы осуществлялась путем сканирования по среднеподмышечной линии между VIII и X ребром. Значение показателя $< 17\%$ расценивалось как дисфункция диафрагмы [80].

$$\text{ФУД} = (\text{толщина в конце вдоха} - \text{толщина в конце выдоха}) / \text{толщина в конце выдоха} \times 100\%$$

В нескольких исследованиях было показано, что оптимальным пороговым значением, связанным с успешной экстубацией трахеи было $\text{ФУД} > 20\text{--}23\%$ [23, 89, 104, 108].

В исследовании с участием 31 ребенка, отмечалась значительная атрофия диафрагмы в первые 24–48 ч проведения ИВЛ со значительным снижением ФУД [47]. В других исследованиях сообщалось о снижении толщины диафрагмы по данным УЗИ на 8,8–13,8 %, со скоростью 0,68–3,4 % в день у детей на ИВЛ [41, 78, 92, 106].

УЗИ диафрагмы: паралич, парез, парадоксальное движение в детской кардиохирургии

Четыре статьи были посвящены ультразвуковой диагностике функции диафрагмы. Были даны и описаны ультразвуковые критерии нормальной функции диафрагмы, ее слабости, паралича и парадоксального движения.

Hamadah H. K. и соавт. проводили УЗИ диафрагмы при подозрении на ее дисфункцию в следующих случаях:

- 1) трудности при отлучении от инвазивной или неинвазивной вентиляции лёгких с ПДКВ: нарастание одышки или появление лабораторных признаков неэффективного газообмена (снижение SaO_2 , гипоксия тканей или респираторный ацидоз);
- 2) повторная интубация в течение 24 часов после экстубации;

3) высокое положение диафрагмы на серийных рентгенограммах грудной клетки при отсутствии вздутия живота и/или ателектаза.

Микроконвексный датчик располагался в подмечевидном ультразвуковом окне в наклонной поперечной плоскости, с маркером, направленным в положение «9 часов», для получения сравнительной визуализации правого и левого купола диафрагмы одновременно.

Второе положение датчика было перпендикулярно грудной стенке, при этом маркер был направлен в положение «12 часов» в восьмом или девятом межреберье, между передней и средней подмышечными линиями.

Было отмечено, что в норме во время вдоха диафрагма движется каудально, что приводит к подъему кривой в М-режиме. В процессе скрининга авторы анализировали два параметра: направление движения и амплитуду экскурсии. Дисфункция диафрагмы указывает либо на ее слабость, либо на паралич.

Двусторонний парез диафрагмы был диагностирован у 1 пациента (5,9 %), парез правого купола диафрагмы – в одном случае (5,9 %), парез левого купола диафрагмы – у пяти пациентов (29,4 %). Левосторонняя диафрагмальная дисфункция преобладала у 12 из 17 пациентов (70,5 %) [119].

Zhang Y. B. и соавт. исследовали паралич диафрагмы у 47 детей, перенесших хирургическую коррекцию ВПС. Подтверждение паралича диафрагмы было достигнуто только с помощью УЗИ в 48,9 % случаев, только с помощью рентгеноскопии – в 40,4 % и при использовании обоих методов одновременно – в 10,6 % случаев. Авторы отметили высокую перспективность УЗИ в качестве основного метода диагностики, поскольку ультразвук обладает диагностическими возможностями, аналогичными рентгеноскопии, облегчает раннюю диагностику у постели больного, не вызывает дискомфорта у пациента, а также исследование легко повторить необходимое количество раз. Отмечается, что в отделении авторов все дети проходят плановую проверку функции диафрагмы с помощью УЗИ перед переводом из отделения интенсивной терапии [87].

Аналогичное исследование было проведено Gil-Juanmiquel L. и соавт. В исследовании приняли участие два детских реаниматолога, прошедших обучение в области УЗИ. Движение диафрагмы классифицировали как нормальное или патологическое (в том числе паретическое, акинетическое и парадоксальное). При каждом обследовании получали изображения в В- и М-режимах. Рентгеноскопия органов грудной клетки была выполнена 16 пациентам (61,5 %), электромиография – 25 пациентам (96,1 %), УЗИ органов грудной клетки – всем 26 пациентам с подозрением на атипичное движение диафрагмы (АДД). Один из реаниматологов (интенсивист 1) обследовал в общей сложности 25 пациентов (96,1 %), а другой (интенсивист 2) – 24 пациента (92,3 %). УЗИ грудной клетки, выполненное интенсивистом 1, имело чувствительность 91 % и специфичность 91 % для диагностики АДД по сравнению с электромиографией. Результаты, полученные интенсивистом 2, обеспечили чувствительность 92 % и специфичность 95 % для диагностики АДД по сравнению с электромиографией. Авторы пришли к выводу, что УЗИ грудной клетки в сочетании В- и М-режимов является эффективным методом диагностики АДД. Метод безвреден, легко доступен, прост в освоении и имеет более высокую чувствительность и специфичность по сравнению с рентгеноскопией грудной клетки у пациентов с клинически подозреваемым АДД [29].

Nozaki Y. и соавт. обращали внимание на то, что метод ультразвуковой диагностики, оценивающий экскурсию диафрагмы, непригоден для оценки ее функции у пациентов, находящихся на принудительной ИВЛ. У категории больных, которым невозможно прервать аппаратное дыхание, авторы предложили проводить оценку фракции утолщения диафрагмы. Был осуществлен перевод ИВЛ во вспомогательный режим вентиляции СРАР (Continuous Positive Airway Pressure), после чего проводилась УЗИ. Оценка функции диафрагмы осуществлялась путем сканирования по средне-подмышечной линии между 8-м и 10-м ребром.

Фракция утолщения диафрагмы = $([\text{толщина в конце вдоха} - \text{толщина в конце выдоха}] / [\text{толщина в конце выдоха}]) \times 100$. При этом значение показателя $< 17 \%$ расценивалось как дисфункция диафрагмы.

В течение трех дыхательных циклов средняя фракция утолщения диафрагмы составляла 31% справа и $0,2 \%$ слева, что указывало на паралич левого купола диафрагмы [80].

1.8 Ультразвуковое исследование лёгких и отлучение от искусственной вентиляции лёгких в детской кардиохирургии

2 статьи были посвящены использованию УЗИ лёгких при отлучении от ИВЛ кардиохирургических пациентов детского возраста. В двух исследованиях были получены противоречивые результаты.

Li M. и соавт. определяли ультразвуковые предикторы успешной экстубации у детей, перенесших операцию на сердце. Ультразвуковой показатель рассчитывался как сумма баллов по результатам сканирования 12 зон лёгких (от 0 до 36). Фракцию выброса левого желудочка (ФВЛЖ) оценивали с использованием метода Симпсона. Двумерное фракционное изменение площади использовалось для количественной оценки функции правого желудочка. Легочная гипертензия (ЛГ) и тяжелая ЛГ определялись как систолическое давление в легочной артерии, превышающее 50% и 75% системного систолического давления соответственно. Из 83 включенных пациентов в возрасте от 3 месяцев до 6 лет были успешно экстубированы 57 ($68,7 \%$). Авторы отмечали, что дети, перенесшие успешную экстубацию, были значительно старше и весили больше, чем дети, которых не удалось экстубировать, также в их случае имело место меньшее время пережатия аорты и искусственного кровообращения. У детей, которых не удалось экстубировать (26 пациентов), увеличивались продолжительность ИВЛ и нахождение в отделении интенсивной терапии. Причинами неудачной экстубации были сердечная недостаточность ($n = 10$), заболевание лёгких ($n = 9$), отек дыхательных путей ($n = 6$) и паралич диафрагмы

(n = 1). В данном исследовании, оценка УЗИ лёгких ≤ 12 и ФВЛЖ ≥ 40 % непосредственно перед попыткой самостоятельного дыхания были единственными независимыми предикторами успешной экстубации [34]. Стоит отметить, что авторы использовали смешанную систему балльной оценки, при которой были определены четыре категории, соответствующие разной степени снижения аэрации лёгких:

- 0) нормальная аэрация – А-линии и 1 или 2 В-линии;
- 1) умеренное снижение аэрации лёгких – множественные четко выраженные В-линии;
- 2) тяжелое снижение аэрации лёгких – множественные сливающиеся В-линии;
- 3) полная потеря аэрации, приводящая к консолидации лёгких.

Singh A. и соавт., напротив, пришли к выводу, что УЗИ лёгких не может достоверно предсказать неудачу при отлучении от ИВЛ, что объясняется многофакторностью отека лёгких после кардиохирургических операций у детей. При этом авторы смогли установить значимость показателя фракции утолщения левого купола диафрагмы менее 17,15 % (чувствительность 85 %) во время вспомогательной вентиляции лёгких для прогнозирования неудачи экстубации трахеи [103].

1.9 Ультразвуковое исследование лёгких и рекрутмент-маневр в детской кардиохирургии

Одна статья была посвящена использованию УЗИ лёгких при оценке рекрутмент-маневра. Song I. K. и соавт. оценили эффективность периоперационного УЗИ лёгких, в том числе в качестве визуального контроля рекрутмент-маневра, у пациентов детского кардиохирургического профиля. В исследование были включены 122 ребенка возрастом 5 лет и младше, которые были разделены на группу вмешательства и контрольную группу.

Пациентов сканировали в положении лежа. Каждый гемиторакс был разделен на шесть областей с использованием трех продольных линий (парастернальной, передней и задней подмышечной) и двух осевых линий (одна над диафрагмой, другая на 1 см выше сосков).

В группе вмешательства маневр рекрутмента выполнялся после каждого УЗИ лёгких при наличии значительного ателектаза, определяемого как 2 или выше балла консолидации в любой области. Рекрутмент-маневр проводился путем ступенчатого повышения давления на вдохе с 10 см Н₂О по 5 см Н₂О с задержкой на каждом уровне по 5 сек. до момента расправления коллабированных участков лёгких по данным УЗИ или до достижения давления в дыхательных путях 40 см Н₂О. Степень консолидации и В-линий оценивалась от 0 до 3 баллов.

В данном рандомизированном исследовании было показано, что периоперационное УЗИ лёгких, в том числе обеспечивающее визуальный контроль при проведении рекрутмент-маневра, оказалось полезным для уменьшения послеоперационных случаев десатурации, улучшения состояния лёгких и сокращения продолжительности ИВЛ.

Частота интраоперационной десатурации составила 36 % в контрольной группе и 19 % в группе вмешательства; частота послеоперационной десатурации – 64 % в контрольной группе и 27 % в группе вмешательства. Частота интра- и послеоперационной десатурации в группе вмешательства была снижена более чем вдвое за счет проведения периоперационного УЗИ лёгких и маневров рекрутмента под ультразвуковым контролем. Продолжительность ИВЛ также была значительно меньше в группе вмешательства, чем в контрольной группе.

Кроме того, отмечалось, что предоперационное УЗИ лёгких выявило аномальное расположение эндотрахеальной трубки в группе вмешательства, а в контрольной группе УЗИ лёгких в послеоперационном периоде выявило значительный плевральный выпот, потребовавший установки дренажа, и незначимый пневмоторакс. Исследователями было указано, что проведение рекрутмент-маневра не вызвало никаких осложнений, таких как гипотония, аритмия или повреждение лёгких.

Авторы делают вывод о том, что периоперационное УЗИ лёгких, в том числе обеспечивающее визуальный контроль проводимого рекрутмент-маневра, оказалось эффективным и полезным для детей, перенесших кардиохирургические операции. Описанная методика снизила частоту послеоперационной десатурации и сократила продолжительность искусственной вентиляции лёгких, что способствовало более активному ее применению в детской кардиохирургии [124].

1.10 Ультразвуковое исследование и сложное поражение лёгких в детской кардиохирургии

В статье Viasucci D. и соавт. было описано использование ультразвукового сканирования при сложном комбинированном поражении лёгких.

Представлен случай успешного применения УЗИ лёгких у мальчика возрастом 1 год с синдромом гипоплазии левых отделов сердца после наложения двунаправленного кавопульмонального анастомоза по Глену и системного шунтирования гипоплазированной левой легочной артерии из левой подключичной артерии. Шунт был установлен между левой подключичной артерией и дистальным коллатеральным левым легочным сосудом. Артериальные ветви верхней доли левого легкого были исключены из кровоснабжения, поэтому апикальная область левого легкого и передняя поверхность язычка не перфузировались. После операции из-за реперфузионного синдрома у пациента произошло резкое снижение растяжимости лёгких: P_{plat} (plateau pressure) > 32 см водного столба и ауто-ПДКВ > 3 см вод. ст.), сопровождающееся респираторным ацидозом ($pH = 7,13$, $P_{aCO_2} = 107$ мм рт. ст.) и снижением соотношения $P_{aO_2}/F_{iO_2} < 100$. Левая верхняя доля подверглась полной ишемии с локализованным инфарктом легкого. Результаты компьютерной томографии показали консолидацию паренхимы в гравитационно-зависимых областях лёгких с помутнениями, напоминающими матовое стекло, и большую область консолидации в левой верхней доле и на передней поверхности язычка. Было начата экстракорпоральная мембранная оксигенация (ЭКМО). УЗИ лёгких

выполнялось ежедневно для мониторинга динамики заболевания. До начала ЭКМО в левом легком наблюдалась область консолидации в апикальной области, тогда как остальное левое и все правое легкое представляли собой картину яркого гиперэхогенного изображения, сочетавшегося с утолщением плевральной линии. На 5-й день, когда состояние пациента начало улучшаться, УЗИ лёгких показало картину неоднородного распределения В-линий, количество которых было в динамике снижено. На 12-й день в рентген-хирургической операционной была обнаружена и окклюзирована сосудистая коллатераль, шунтирующая кровь из верхней полый вены в левое предсердие, что приводило к значительной десатурации в результате смешения венозной и артериальной порций крови и снижения кровотока по сформированному кавопульмональному контуру. На этом этапе В-линии стали становиться менее заметными, а А-линии стали видимыми. Пациента отлучили от ЭКМО на 13-й день. На фоне ИВЛ газообмен значительно улучшился. Как рентгенограмма грудной клетки, так и УЗИ лёгких показали, что зона консолидации в апикальной области левого легкого оставалась неизменной в течение клинического течения пациента.

По мнению авторов, данный случай свидетельствует о том, что УЗИ лёгких является полезным инструментом для мониторинга прогрессирования заболеваний лёгких у детей и наглядной оценки эффективности проводимой терапии, помогающим врачам обеспечить соответствующее лечение. В частности, в этом случае решение об отмене ЭКМО также было принято на основе сонографических данных улучшения перфузируемых долей. Кроме того, неинвазивное прикроватное УЗИ лёгких может помочь врачам ограничить частоту выполнения рентгенографии и компьютерной томографии органов грудной клетки, тем самым минимизируя радиационное воздействие на организм. Исходя из вышеперечисленных характеристик, УЗИ лёгких оказывается особенно полезным для нестабильных пациентов детского возраста [101].

Vajracharya S. M. и соавт. было проведено исследование эффективности ультразвукового метода диагностики поражения лёгких у детей после кардиохирургических операций, в сравнении с рентгенографией органов грудной

клетки. В исследовании участвовал 141 ребенок в возрасте до 14 лет. УЗИ проводилось в первый послеоперационный день. Авторы проводили оценку паренхимы лёгких в передних, боковых и задних отделах лёгких, а также оценивали наличие жидкости в плевральных полостях и исключали пневмоторакс. В сравнении с рентгенографией органов грудной клетки, УЗИ лёгких имело общую чувствительность 60 %, специфичность 72,4 %, положительную прогностическую ценность 31,9 % и отрицательную прогностическую ценность 89,3 % и диагностическую точность 70,2 % для диагностики консолидации; для ателектаза УЗИ имело чувствительность 50 %, специфичность 76,9 %, прогностическую ценность положительного результата 30,7 %, прогностическую ценность отрицательного результата 88,2 % и диагностическую точность 72,3 %.

Стоит отметить, что такое разделение синдрома уплотнения легочной ткани (синдрома альвеолярной консолидации) на «консолидации» и ателектазы было проведено авторами исследования на основе анализа воздушных бронхограмм. При наличии динамических бронхограмм авторы констатировали наличие «консолидации», а при наличии статических бронхограмм или при их полном отсутствии – ателектаза.

Для диагностики плеврального выпота УЗИ лёгких показало чувствительность 90 %, специфичность 82,6 %, прогностическую ценность положительного результата 46,1 %, прогностическую ценность отрицательного результата 98 % и диагностическую точность 83,6 %. Пневмоторакса за период исследования авторами выявлено не было [28].

1.11 Резюме

Современные исследования убедительно демонстрируют высокую диагностическую ценность УЗИ лёгких в детской реаниматологии. Метод зарекомендовал себя как быстрый, безопасный и высокоинформативный

прикроватный инструмент, превосходящий стандартную рентгенографию в диагностике ключевых патологических синдромов в лёгких.

Ультразвуковое исследование лёгких у детей является высокоэффективным методом визуализации для прикроватной диагностики острой дыхательной недостаточности различного генеза: синдрома альвеолярной консолидации, интерстициального синдрома, синдрома плеврального выпота и пневмоторакса, аномального движения диафрагмы. Данный метод в руках анестезиолога-реаниматолога позволяет значительно расширить возможности дифференциальной диагностики, снизить уровень лучевой нагрузки на ребенка, а также потенциально позитивно повлиять на эффективность интенсивной терапии, проводимой под ультразвуковым контролем.

Особый интерес представляет применение УЗИ лёгких в детской кардиохирургии, где ОДН является частым и мультифакторным осложнением раннего послеоперационного периода. Анализ литературы показал, что данный перспективный метод прикроватной диагностики состояния лёгких и тканей грудной полости позволяет диагностировать отек лёгких (интерстициальный синдром), ателектазы (синдром альвеолярной консолидации), пневмоторакс, оценивать функцию диафрагмы, проводить визуально контролируемые рекрутмент-маневры, прогнозировать успешную экстубацию трахеи у детей кардиохирургического профиля. Однако существующие подходы носят фрагментарный характер. Данные, полученные авторами при анализе интерстициального синдрома и выраженности В-линий у детей кардиохирургического профиля, согласуются с данными из других областей медицины [53, 64, 73, 122]. Было показано, что анализ выраженности интерстициального синдрома может быть проведен как методом оценки количества В-линий, так и методом процентного отношения В-линий к протяженности межреберного промежутка. Также было выявлено, что применение фуросемида снижает количество В-линий, что патофизиологически представляется логичным.

Имеется ограничение в исследовании, проведенном Wu L. и соавт [76]. Авторы проводили поиск ателектазов у детей в положении лежа на спине, не осуществляя повороты на бок и не сканируя задние отделы лёгких, в которых потенциально чаще возникают очаги консолидации в связи с более выраженной гиповентиляцией этих отделов.

Напряженный пневмоторакс, описанный в анализе клинического случая, имел классические ультразвуковые признаки, обозначенные в blue-протоколе.

Стоит отметить, что большинство авторов, включенных в систематизированный обзор, указывают, что оценивали функцию диафрагмы только при переводе на самостоятельное дыхание, прерывая ИВЛ [29, 119], что является большим ограничением метода у нестабильных пациентов с тяжелым поражением лёгких. Однако Nozaki Y. и соавт. [80] предложили оценивать функцию диафрагмы у данной категории пациентов на основе измерения фракции утолщения диафрагмы, но основывались они на полученных данных 1 клинического случая, что, безусловно, нерепрезентативно и требует дальнейших исследований. Zhang Y. B. и соавт. не указали, выполнялся перевод на самостоятельное дыхание на время УЗИ функции диафрагмы или нет [87].

В статье Vajracharya S. M. и соавт. [28], в которой исследовалась эффективность ультразвукового метода диагностики легочного поражения у детей после кардиохирургических операций в сравнении с рентгенографией органов грудной клетки, описаны довольно неоднозначные результаты, которые противоречат данным литературы. В качестве эталонного метода авторами был выбран метод рентгенографии органов грудной клетки в прямой проекции, результаты которого оценивались разными врачами (интенсивистами). Учитывая наличие большого количества данных о том, что УЗИ лёгких превосходит по чувствительности рентгенографию в диагностике синдрома альвеолярной консолидации [30, 67, 82, 83], возникает сомнение в корректности такой оценки эффективности метода.

Анализ эффективности применения УЗИ лёгких при отлучении от ИВЛ проводился в двух исследованиях, где были получены противоположные

результаты. Стоит отметить, что на результаты Singh A. и соавт. [97] мог повлиять тот факт, что в исследовании участвовали разнородные возрастные группы – от 1 месяца до 18 лет. В группе неудачного отлучения от ИВЛ возраст пациентов был значительно ниже, чем в группе с удачной экстубацией трахеи, также размер выборки был слишком мал (группа с неудачным отлучением от ИВЛ составляла всего 7 человек). В исследовании же Li M. и соавт. [34] участвовали дети более однородной возрастной группы – от 3 месяцев до 6 лет, при этом группа с неудачной экстубацией трахеи составляла 26 человек.

В исследовании эффективности рекрутмент-маневра под контролем УЗИ лёгких необходимо отметить, что анестезиолог-реаниматолог, проводивший ультразвуковое сканирование лёгких и маневр рекрутмента, не был «ослеплен», что могло повлиять на результаты исследования.

При систематическом анализе литературы выяснилось, что исследования, посвященные применению УЗИ лёгких в детской кардиохирургии, весьма фрагментарны. Не было найдено ни одной русскоязычной статьи даже после повторного, более расширенного поиска. Данные факты говорят о крайне низкой степени проработанности темы и необходимости дальнейших исследований у данной категории пациентов с формированием клинических рекомендаций для практического здравоохранения.

Таким образом, проведенный анализ научной литературы выявил ряд существенных пробелов, препятствующих широкому и стандартизированному внедрению УЗИ лёгких в клиническую практику для профилактики и лечения ОДН:

- 1) отсутствует стандартизированный подход к оценке ультразвуковой картины лёгких у детей в том числе после проведенных кардиохирургических вмешательств. Существующие балльные системы (6- или 12-зонные шкалы) либо объединяют разнородные патофизиологические синдромы (интерстициальный синдром и синдром альвеолярной консолидации) в единую балльную шкалу, либо игнорируют ключевые ультразвуковые маркеры – такие как тип воздушных бронхограмм, локальный В+ синдром, пневмоторакс, плевральный выпот и

функцию диафрагмы, что существенно снижает прогностическую и диагностическую ценность УЗИ лёгких;

2) не описана комплексная ультразвуковая картина лёгких, наиболее характерная для пациентов исследуемой категории с ОДН. Большинство исследований фокусируются на отдельных аспектах легочной патологии, не учитывая комплексное взаимодействие всех ультразвуковых синдромов в патогенезе ОДН;

3) отсутствуют валидированные прогностические модели, интегрирующие ультразвуковые, клинические, демографические и инструментальные параметры для раннего выявления пациентов с высоким риском развития ОДН. Прогностические модели, предложенные в литературе, основаны на ограниченном наборе ультразвуковых параметров, не проходили внутреннюю валидацию на независимых выборках, а их эффективность часто не оценивались количественно. Более того, в доступных источниках отсутствуют исследования, направленные на выявление независимых ультразвуковых предикторов ОДН с учётом полного спектра ультразвуковых синдромов;

4) не установлены взаимосвязи между ультразвуковыми параметрами и развитием ОДН, а также не оценена их диагностическая ценность у детей грудного возраста в раннем послеоперационном периоде после кардиохирургических вмешательств;

5) не доказана эффективность персонализированной интенсивной терапии, основанной на динамическом УЗИ-мониторинге, в снижении частоты ОДН и улучшении оксигенации у детей грудного возраста после радикальных кардиохирургических вмешательств. Имеющиеся данные ограничены изолированными терапевтическими вмешательствами (применением диуретических препаратов или рекрутмент-манёвров), оценкой лишь отдельных синдромов.

Перечисленные пробелы определяют научную новизну и практическую значимость настоящего исследования, направленного на создание и валидацию прогностической модели «LUCN-D», а также выявление независимых

ультразвуковых предикторов, взаимосвязей ультразвуковых параметров с ОДН и их диагностической ценности, описание типовой ультразвуковой картины лёгких при ОДН и оценку эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики ОДН на основе разработанного стандартизированного 12-зонного протокола УЗИ лёгких.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Настоящее исследование представляет собой комплексное, двухэтапное, одноцентровое проспективное клиническое исследование, проведенное на базе ОАРд ФГБУ «Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии» Минздрава России (г. Красноярск) в период с октября 2023 года по март 2025 года. Протоколы исследований и проекты информированных согласий были одобрены локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России (протокол № 122/2023 от 29.11.2023). Информированное согласие было получено от законных представителей всех пациентов до начала участия в исследовании.

В исследование на всех этапах включались пациенты, соответствующие следующим критериям:

Критерии включения:

- 1) возраст от 1 до 12 месяцев на момент проведения исследования;
- 2) плановая первичная радикальная коррекция врожденного порока сердца (ВПС) в условиях искусственного кровообращения (ИК);
- 3) наличие подписанного добровольного информированного согласия от родителей или законных представителей.

Критерии не включения:

- 1) возраст менее 1 месяца или старше 1 года;
- 2) наличие тяжелых сопутствующих заболеваний, способных значительно повлиять на течение раннего послеоперационного периода;
- 3) цианотические формы ВПС;
- 4) паллиативные хирургические вмешательства;
- 5) операции, выполненные без применения искусственного кровообращения;
- 6) отсутствие информированного согласия.

Критерии исключения:

- 1) отзыв информированного согласия в ходе исследования;

- 2) летальный исход до завершения наблюдения.

В диссертационное исследование было включено 72 пациента, отобранных методом сплошного охвата при соответствии критериям включения в период с октября 2023 по март 2025 года. В ходе проведения исследования был зарегистрирован 1 летальный исход на пилотном этапе исследования в контрольной группе (сепсис, синдром полиорганной недостаточности). Согласно критериям исключения, пациент был исключен из исследования. Таким образом, общая выборка составила 71 пациента, подходившего под критерии включения и не имевшего критериев исключения. Исследование состояло из двух последовательных этапов: пилотного и заключительного. В связи с двухэтапным характером исследования и различными методологическими требованиями для решения отдельных задач, общая выборка была сформирована последовательно. Этапы исследования описаны в разделах 2.1. и 2.2.

Все пациенты на двух этапах исследования были случайным образом разделены на группы (исследуемая и контрольная группы) по типу терапии с помощью простой рандомизации. Рандомизация проводилась при поступлении в стационар и до начала диагностических и лечебных мероприятий для минимизации систематических ошибок. Каждому новому участнику независимо от других с вероятностью 0,5 присваивалась одна из двух групп с использованием генератора псевдослучайных чисел. Таким образом, распределение участников по группам происходило без фиксированного соотношения, и итоговый размер групп определялся исключительно реализацией случайного процесса. Описания рандомизированных групп будут даны в разделах 2.1. и 2.2.

Сбор данных в ходе диссертационного исследования проводилась на 4 оценочных периодах:

- 1) дооперационный оценочный период (за 18–24 часа до выполнения оперативного вмешательства). Переменные, значения которых были получены на данном периоде, в базе данных обозначались как «Переменная_0»;
- 2) послеоперационный оценочный период (в течение 2 часов после поступления пациента из операционной в ОАРд). Переменные, значения которых

были получены на данном периоде в базе данных обозначались как «Переменная _1»;

3) оценочный период в конце первых реанимационных суток. Переменные, значения которых были получены на данном периоде в базе данных обозначались как «Переменная _2»;

4) оценочный период перед переводом в профильное отделение. Переменные, значения которых были получены на данном периоде в базе данных обозначались как «Переменная _4».

Исходно была создана индивидуальная регистрационная карта пациента и протокол УЗИ лёгких, куда вносились все необходимые для исследования данные пациентов. В последующем, на основе данной первичной документации, была реализована электронная база данных.

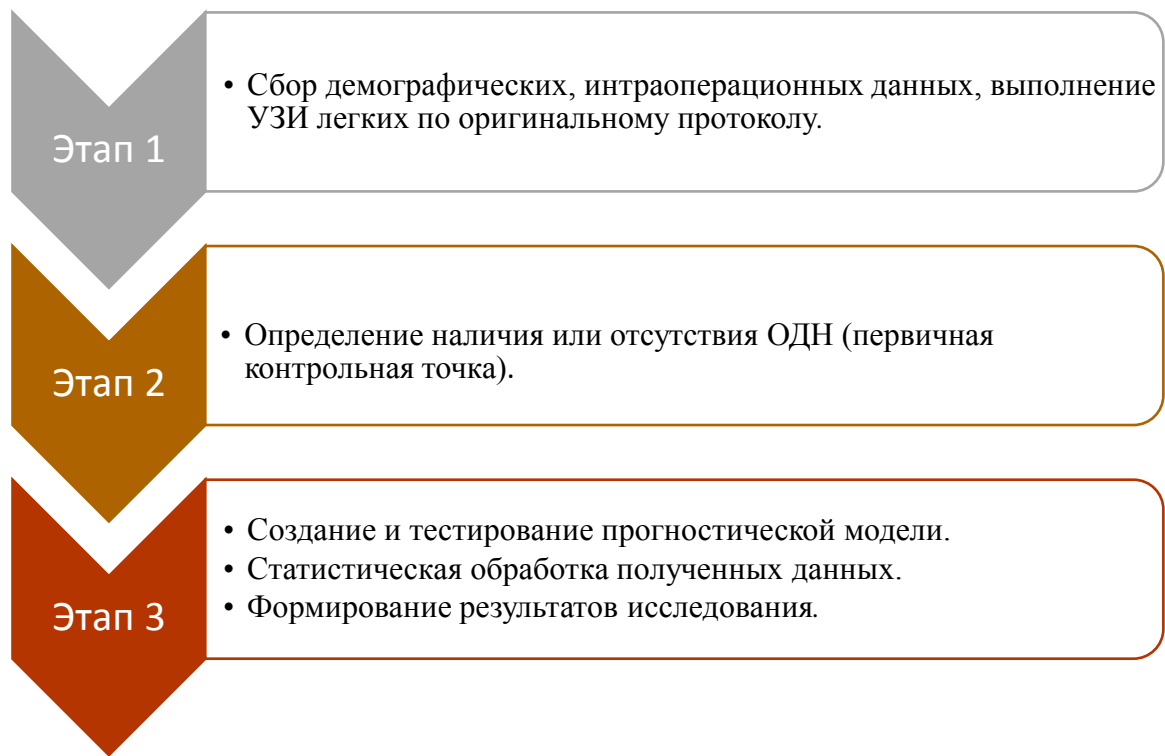
2.1 Первый этап исследования (пилотный)

Для выполнения пилотной части исследования – создания прогностической модели и выявления независимых предикторов развития ОДН, на первом этапе с октября 2023 по декабрь 2024 года методом сплошного охвата был включен 61 пациент, однако 1 пациент был исключен в связи с летальным исходом. Таким образом, на пилотном этапе выборка составила 60 пациентов возрастом 114,0 (61,5; 184,8) дней, массой 5,8 (4,9; 6,8) кг, ростом 61,0 (56,8; 64,0) см. Подробные характеристики пациентов представлены в Таблице 1. Объем выборки в 60 пациентов является ограниченным, что характерно для клинических исследований в области детской кардиохирургии. Это ограничение связано с малым числом пациентов, нуждающихся в таких вмешательствах. Учитывая ограниченный объем выборки, была применена строгая методология: обучение модели на обучающей подвыборке, её фиксация, последующая калибровка на независимой калибровочной подвыборке и кросс-валидация по методу Монте-Карло с 1 000 итераций на независимой тестовой подвыборке.

Таблица 1 – Базовые характеристики пациентов (n = 60), включенных на пилотном этапе исследования

Показатель	Значение
Возраст (дни)	114,0 (61,5; 184,8)
Масса пациента (кг)	5,8 (4,9; 6,8)
Рост пациента (см)	61,0 (56,8; 64,0)
Пол пациента (муж)	29 (48,3 %)
ВПС с гиперволеимией МКК (%)	42 (70,0 %)
Дыхательная недостаточность	35 (58,3 %)
Длительность ИК (мин)	50,0 (40,0; 70,0)
Длительность пережатия аорты (мин)	28,5 (22,8; 42,5)

Данное пилотное проспективное рандомизированное контролируемое исследование включало 3 этапа. На первом этапе производился сбор данных для создания прогностической модели на дооперационном и послеоперационном оценочных периодах. На втором этапе выполнялось определение наличия или отсутствия ОДН в оценочном периоде перед переводом в профильное отделение (первичная конечная точка). На третьем этапе осуществлялись создание и тестирование прогностических моделей, статистическая обработка данных и формирование результатов исследования (Рисунок 13).



Примечание: Этап 1 – Дооперационный и послеоперационный оценочные периоды.
Этап 2 – Оценочный период перед переводом в профильное отделение.

Рисунок 13 – Блок-схема дизайна исследования

2.1.1 Сбор данных

Протокол УЗИ лёгких. УЗИ лёгких выполнялось линейными датчиками 5–12 МГц аппарата Philips CX50 (Philips, Нидерланды) и 8–18 МГц аппарата GE Logiq E (GE Healthcare, США) для оценки интерстициального синдрома, синдрома альвеолярной консолидации, воздушных бронхограмм, локального В+ синдрома, плеврального выпота и пневмоторакса. Базовый режим: абдоминальный, глубина сканирования – 3,0–4,5 см. Для диагностики характера движения диафрагмы использовался конвексный датчик 1–5 МГц аппарата Philips CX50 (Philips, Нидерланды) и микроконвексный датчик 4,2–11 МГц аппарата GE Logiq E (GE Healthcare, США). Базовый режим: абдоминальный, глубина сканирования подбиралась индивидуально в зависимости от конституциональных особенностей пациентов.

Протокол УЗИ лёгких выполнялся одним исследователем на каждом оценочном периоде исследования.

Было решено учитывать следующие ультразвуковые синдромы:

- 1) интерстициальный синдром;
- 2) синдром альвеолярной консолидации;
- 3) синдром плеврального выпота (гидроторакс);
- 4) пневмоторакс;
- 5) характер движения диафрагмы;
- 6) локальный В+ синдром.

На основе выдвинутой гипотезы о том, что все ультразвуковые синдромы имеют разный вклад в увеличение вероятности развития ОДН в послеоперационном периоде, было решено отдельно учитывать все ультразвуковые синдромы и ввести оригинальную балльную систему для подсчета выраженности каждого синдрома, независимо друг от друга в рамках одного ультразвукового протокола.

Грудная клетка была разделена на 2 половины – левую и правую по грудине спереди и по позвоночному столбу сзади. Каждая половина грудной клетки разделялась на 3 отдела: передний, боковой и задний. Передний отдел начинался от парастеральной линии и заканчивался передней подмышечной линией. Боковой отдел начинался от передней подмышечной линии и заканчивался задней подмышечной линией. Задний отдел начинался от задней подмышечной линии и заканчивался позвоночным столбом. Каждый отдел, в свою очередь, разделялся на верхнюю и нижнюю зоны примерно пополам по причине отсутствия стандартизированных ориентиров для всех комплекций детей от 1 месяца до 1 года. Суммарно в каждой половине грудной клетки выделялось 6 зон. Суммарно 12 зон. Сканирование проводилось при продольном положении линейного датчика (параллельно межреберью) ковровым методом справа-налево и сверху-вниз.

Методика оценки интерстициального синдрома

Интерстициальный синдром оценивался полуколичественным методом по

выраженности В-линий. В каждом сегменте выбирался межреберный промежуток с наибольшим количеством В-линий входящих в один ультразвуковой срез.

Выраженность интерстициального синдрома оценивалась в баллах по отношению количества В-линий к межреберному промежутку (Рисунок 14).

0 баллов – В-линии отсутствуют.

1 балл – до 10 % В-линий в одном ультразвуковом среде (единичные В-линии).

2 балла – от 10 % до 50 % В-линий в одном ультразвуковом срезе.

3 балла – от 50 % до 90 % В-линий в одном ультразвуковом срезе.

4 балла – более 90 % В-линий в одном ультразвуковом срезе («белое легкое»).

В случаях пограничного значения выраженности В-линий в ультразвуковом срезе (например, 50 %), выставялся высший балл (3 балла).

Для каждой зоны в базе данных было создано свое наименование. Пример: «RightLungPosteriorDown_BLines» – для оценки выраженности интерстициального синдрома в нижней зоне заднего отдела правого легкого.

Дополнительно, для создания прогностической модели, оценивалась выраженность интерстициального синдрома в каждом легком («RightLungInterstitialSyndrome» и «LeftLungInterstitialSyndrome») отдельно путем суммации баллов всех зон: интерстициальный синдром легкой степени (до 6 баллов включительно в одном легком), средней степени (от 7 до 12 баллов включительно), тяжелой степени (от 13 до 18 баллов включительно), крайне тяжелой степени (от 19 до 24 баллов).

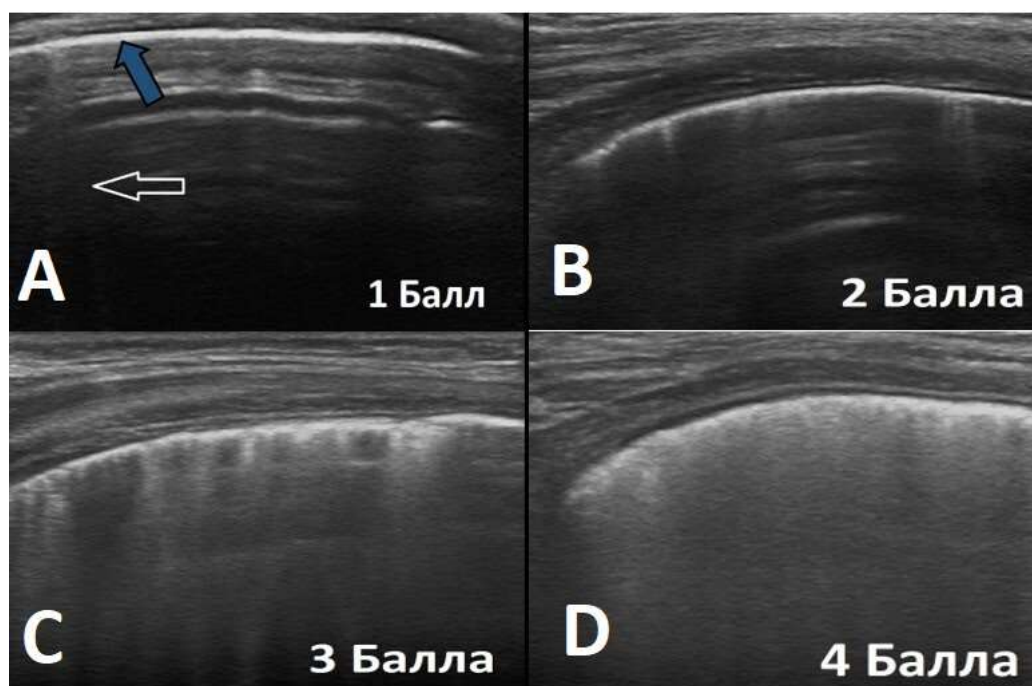


Рисунок 14 – Оценка выраженности интерстициального синдрома в баллах

Белой стрелкой указана В-линия – вертикальный гиперэхогенный луч, исходящий из плевральной линии (синяя стрелка). А – 1 балл (до 10 % В-линий в ультразвуковом срезе – единичные В-линии), В – 2 балла (от 10 % до 50 % В-линий в ультразвуковом срезе), С – 3 балла (от 50 % до 90 % В-линий в ультразвуковом срезе), С – 4 балла (более 90 % В-линий в одном ультразвуковом срезе – «белое легкое»).

Методика оценки синдрома альвеолярной консолидации

Оценка выраженности синдрома альвеолярной консолидации проходила путем оценки ее размера относительно всего исследуемой зоны.

0 баллов – альвеолярная консолидация отсутствует.

1 балл – небольшая субплевральная консолидация, визуализируемая в одном межреберном промежутке.

2 балла – альвеолярная консолидация, визуализируемая более чем в 1 межреберном промежутке, но занимающая менее 50 % исследуемой зоны.

3 балла – альвеолярная консолидация, занимающая более 50 % исследуемой зоны.

4 балла – альвеолярная консолидация, занимающая всю зону сканирования.

При наличии альвеолярной консолидации, оцениваемой в 4 балла, подсчет В-линий не возможен. В таких случаях в оценке интерстициального синдрома выставлялось 0 баллов. В случаях пограничного значения выраженности альвеолярной консолидации выставлялся высший балл.

При наличии альвеолярной консолидации также оценивалось наличие воздушных бронхограмм. Отдельно выделялись динамические и статические воздушные бронхограммы (Рисунок 15), а также их отсутствие.

Для каждой зоны в базе данных было создано свое наименование. Пример названия переменной: «RightLungPosteriorDown_Consolidation» – для оценки альвеолярной консолидации нижней зона заднего отдела правого легкого.

Для оценки воздушной бронхограммы в данной зоне: «RightLungPosteriorDown_AirBrochograms».

Где 0 – бронхограммы отсутствуют так как нет альвеолярной консолидации.

1 – динамическая воздушная бронхограмма.

2 – статическая воздушная бронхограмма.

3 – воздушной бронхограммы в зоне альвеолярной консолидации нет.

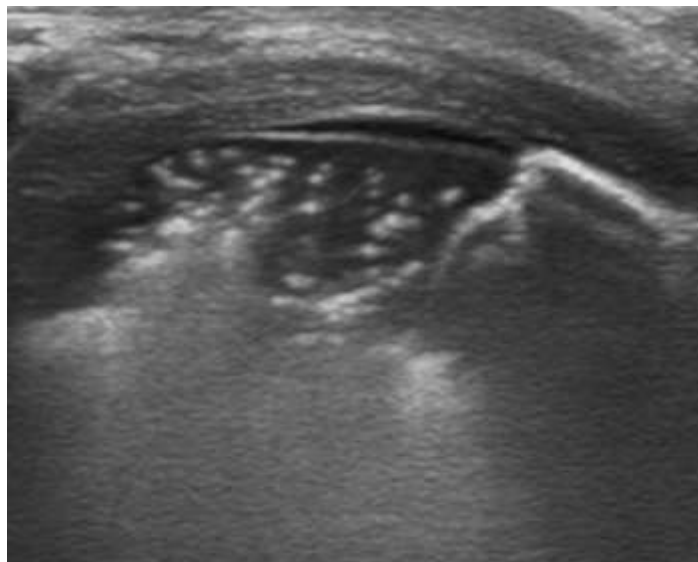


Рисунок 15 – Участок альвеолярной консолидации с воздушной бронхограммой

Методика оценки плеврального выпота

При обнаружении признаков наличия плеврального выпота проводился подсчет его примерного объема.

Для этого пациент укладывался в строго горизонтальное положение на 5 минут с целью равномерного распределения выпота по плевральной полости. После чего производился измерение толщины выпота по задней подмышечной линии трехкратно. Максимальная толщина в миллиметрах подставлялась в модифицированную формулу Valik с поправочными коэффициентами по массе тела по методике, описанной в главе 1 [19].

Объем плеврального выпота классифицировался как: 0 баллов – плевральный выпот отсутствует, 1 балл – малый плевральный выпот – менее 5 мл/кг массы тела, 2 балла – умеренный плевральный выпот – от 5 мл/кг до 10 мл/кг, 3 балла – массивный плевральный выпот – более 10 мл/кг. В случаях пограничного значения выраженности плеврального выпота выставлялся высший балл.

Баллы фиксировались в базу данных под наименованием «RightLungHydrothorax»- для правой плевральной полости, «LeftLungHydrothorax» – для левой плевральной полости.

Методика оценки пневмоторакса

Пневмоторакс оценивался в положении пациента лежа на спине строго горизонтально. Определялось положение «точки легкого» – границы пневмоторакса. Пневмоторакс классифицировался как:

0 – пневмоторакса нет;

1 – малый пневмоторакс: при наличии точки легкого, не достигающей передней подмышечной линии;

2 – умеренный пневмоторакс: при наличии точки легкого между передней и средней подмышечными линиями;

3 – массивный пневмоторакс: точка легкого находится кзади от средней подмышечной линии или не определяется вовсе.

В случаях пограничного значения выраженности пневмоторакса выставлялся высший балл.

Результат вносился в электронную базу данных под наименованием «RightLungPneumothorax» – для правой плевральной полости, «LeftLungPneumothorax» – для левой плевральной полости.

Методика оценки характера движения диафрагмы

Проводилась оценка характера движения обоих куполов диафрагмы в «В» и «М» режимах.

При самостоятельном дыхании ребенка характер движения купола диафрагмы подразделялся на:

0 – норма: движения куполов диафрагмы синхронны, движение на вдохе направлено каудально, в М-режиме волна направлена вершиной вверх;

1 – парез (паралич): движение купола отсутствует или минимально, в М-режиме изолиния или низкоамплитудная волна, направленная вверх;

2 – парадоксальное движение: движение купола диафрагмы направлено краниально, в М-режиме инвертированная волна.

При проведении аппаратной ИВЛ в соответствующем оценочном периоде характер движения диафрагмы указывался как норма.

Результат вносился в электронную базу данных под наименованием: «RightLungDiaphragm» – для правого купола диафрагмы, «LeftLungDiaphragm» – для левого купола.

Методика оценки локального В+ синдрома

Локальный В+ синдром фиксировался отдельно для каждой зоны легкого в случае локального появления компактно расположенных множественных «сливных» В-линий, значимо превышающих по количеству число В-линий в остальном исследуемом межреберном промежутке зоны (Рисунок 16).

Результат вносился в электронную базу данных в формате есть/нет (1/0) для каждой зоны легкого. Пример названия переменной: «RightLungPosteriorDown_LocalBSyndrome» – для нижней зоны заднего отдела правого легкого.

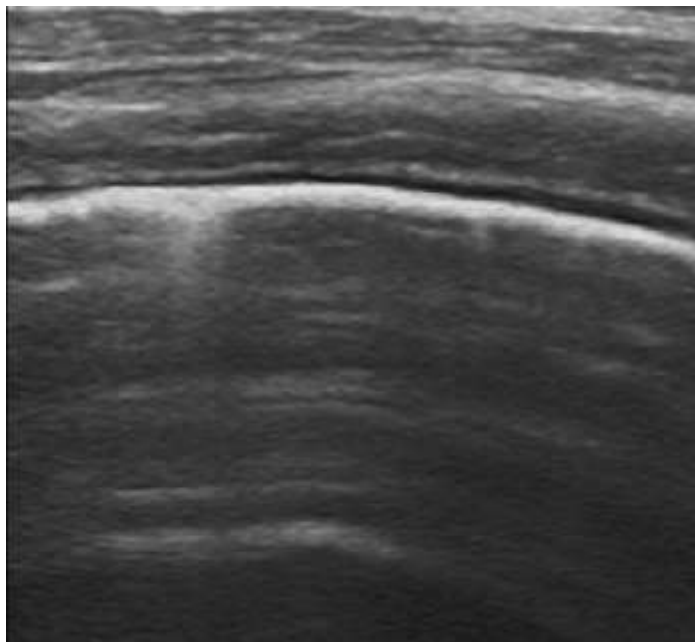


Рисунок 16 – Локальный В+ синдром

Группа интенсивной терапии. Все 60 пациентов, включенных в данное исследование, в связи с потенциальной клинической значимостью возможности учета предиктивной моделью стратегии интенсивной терапии (под контролем или без УЗИ лёгких) при поступлении в кардиохирургическое отделение № 4 разделялись на 2 группы при помощи рандомизации, согласно ранее описанным принципам:

Группа 0 (26 пациентов) – группа интенсивной терапии под контролем УЗИ лёгких. Интенсивная терапия в послеоперационном периоде осуществлялась с учетом данных УЗИ лёгких, и проводился УЗИ контроль в динамике. УЗИ в послеоперационном периоде проводилось минимум трижды: в течение 2 часов после поступления пациента из операционной в палату интенсивной терапии ОАРд (2 оценочный период), через 2–4 часа после начала терапии и после экстубации трахеи. Количество и частота УЗИ лёгких в данной группе ограничены не были. Результаты данных дополнительных исследований, выполненных вне обозначенных оценочных периодов исследования, в базу данных не вносились.

Группа 1 (34 пациента) – группа интенсивной терапии без контроля УЗИ

лёгких. Интенсивная терапия проводилась исходя из данных объективного осмотра, лабораторных и инструментальных данных, исходного типа ВПС, характера выполненного оперативного вмешательства, опыта дежурного врача-реаниматолога. Результаты проведенного УЗИ лёгких дежурному врачу-реаниматологу не сообщались, рекомендации не выдавались. Интенсивная терапия осуществлялась без использования данного метода, что учитывалось при формировании базы данных и создании прогностической модели с целью повышения ее точности, чувствительности и специфичности.

Различия в тактике интенсивной терапии будут подробно описаны в разделе 2.3.

Демографические данные. В базе данных для выполнения поставленной задачи учитывались: пол, масса, рост, возраст.

УЗИ лёгких. Выполнялось исследователем по оригинальному протоколу, описанному выше. В базе данных учитывались результаты УЗИ лёгких, полученные на 1 и 2 оценочных периодах.

Интраоперационные данные. В данном разделе для выполнения поставленной задачи фиксировалось влияние ВПС на легочный кровоток (ВПС с гиперволемией малого круга кровообращения (МКК) или ВПС без гиперволеии МКК), продолжительность ИК в мин., продолжительность окклюзии аорты в мин.

В исследование были включены дети ($n = 60$) со следующими ВПС:

Врождённый порок сердца с гиперволемией МКК: септальные дефекты (дефект межжелудочковой перегородки, дефект межпредсердной перегородки, их комбинации).

Врождённый порок сердца без гиперволеии МКК: клапанный стеноз легочной артерии, клапанный стеноз аорты, коарктация аорты, аномальное отхождение левой коронарной артерии от легочной артерии, недостаточность митрального клапана.

2.1.2 Алгоритм перевода пациента из отделения реанимации и обоснование выбора критериев острой дыхательной недостаточности

Решение о переводе из реанимации принималось с участием заведующего реанимацией, заведующего кардиохирургическим отделением, лечащего кардиолога и дежурного реаниматолога, учитывая лабораторные анализы крови (в том числе газовый состав), наличие и выраженность тахипноэ, результатов рентгенологического исследования лёгких, данных мониторинга, а также клинического состояния ребенка при инсуффляции увлажненного кислорода через назальные канюли с потоком до 1,5 л/мин.

В случае, если у пациента наблюдалось выраженное тахипноэ, перкутанная сатурация (SpO_2) < 92 % при инсуффляции увлажненного кислорода, долевые или тотальные участки затемнения по данным рентгенографии органов грудной клетки, то пациент не переводился в палату профильного отделения, и, соответственно, первичная контрольная точка не наступала, пациент оставался в отделении реанимации на 24 часа с повторным контролем.

В случае компенсированного состояния пациента, в том числе по дыхательной функции при инсуффляции увлажненного кислорода до 1,5 л/мин через назальные канюли, принималось решение о переводе в профильное отделение, что было первичной контрольной точкой исследования.

Для объективизации оценки респираторной функции все дети непосредственно перед переводом из реанимации в профильное отделение переводились на самостоятельное дыхание атмосферным кислородом на 10 минут, после чего осуществлялся забор артериальной крови для оценки PaO_2 , сатурации артериальной крови (SaO_2) и PaO_2/FiO_2 .

В некоторых исследованиях по кардиохирургии, ОДН фиксировалась у пациентов в послеоперационном периоде при значении $PaO_2/FiO_2 < 300$ [11]. В соответствии с European Perioperative Clinical Outcome definitions [103], критериями ОДН являются значения $PaO_2/FiO_2 < 300$ или $SpO_2 < 90$ %. Однако имеются данные, что у детей $SpO_2 < 92$ % уже является критерием наличия ОДН [4].

Так как перкутанная сатурация зависит от множества факторов, включая перфузию и температуру конкретного участка тела, где находится пульсоксиметр, было решено использовать более точный маркер – SaO_2 .

2.1.3 Критерии острой дыхательной недостаточности

Оценка наличия ОДН у пациентов осуществлялась непосредственно перед переводом из ОАРд в кардиохирургическое отделение № 4. Решение о переводе принималось совместно после обсуждения на обходе с заведующим ОАРд и заведующим кардиохирургическим отделением № 4, согласно описанному в разделе 2.1.2. алгоритму.

Для оценки проявлений ОДН все дети переводились на самостоятельное дыхание атмосферным кислородом на 10 минут, после чего осуществлялся забор артериальной крови для оценки PaO_2 , SaO_2 и PaO_2/FiO_2 . Забор крови производился из лучевой или общей бедренной артерии в зависимости от локализации установленного артериального катетера. Анализ проводился на анализаторе газов крови GEM Premier 3500 (Instrumentation Laboratory, США) с ежедневной калибровкой.

В исследовании критериями наличия ОДН были: значение $PaO_2/FiO_2 < 300$ и/или $SaO_2 < 92\%$ и/или нарастание частоты дыхательных движений $> 30\%$ от исходной величины при самостоятельном дыхании с инсуффляцией увлажненного кислорода в состоянии покоя в 4 оценочном периоде, до проведения теста спонтанного дыхания атмосферным кислородом. Отмечалось резюмирующее значение: ОДН есть или ОДН нет.

2.2 Второй этап исследования (заключительный)

При планировании проспективного обсервационного исследования для описания ультразвуковой семиотики патологических изменений в лёгких у детей с ОДН, а также проспективного обсервационного исследования для выявления

взаимосвязи клинических и инструментальных данных с ОДН и их диагностической ценности, был рассчитан минимальный размер выборки с помощью программы G*Power 3.1.9.7. Для достижения мощности исследования 80 % и уровня значимости $\alpha = 0,05$ для коэффициентов корреляции 0,4 (средний эффект), а также для проведения логистической регрессии необходимое минимальное число пациентов составило 59 человек.

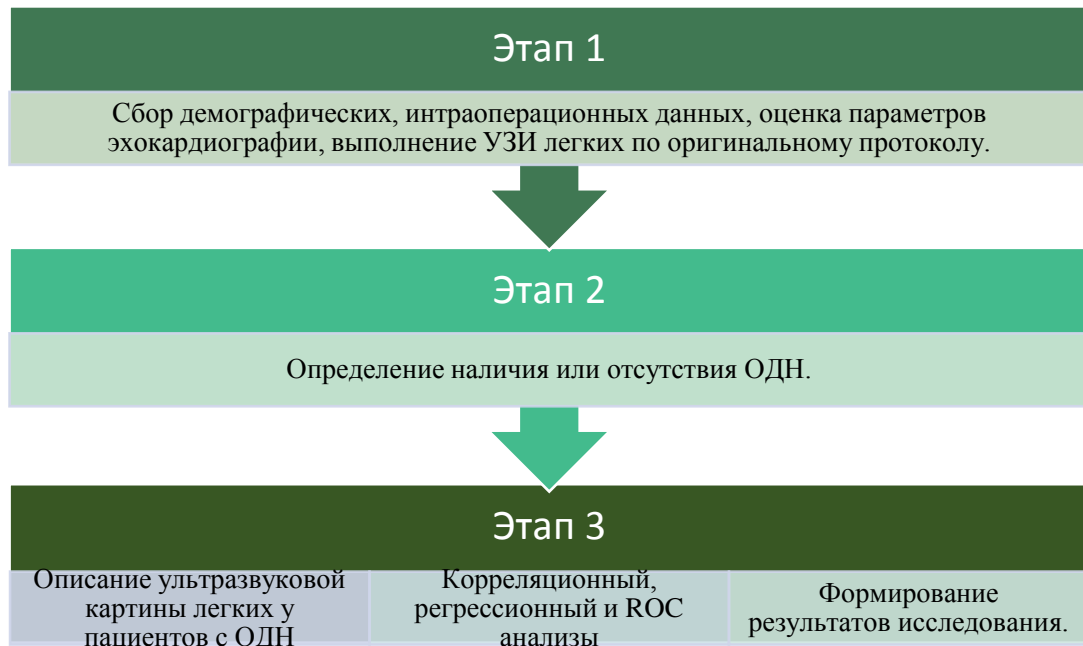
При планировании проспективного рандомизированного контролируемого исследования оценки эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики ОДН был также рассчитан минимальный размер выборки с помощью программы G*Power 3.1.9.7. Наименьший, из сообщённых в исследованиях, включенных в литературный обзор, размер эффекта (Cohen's d) для первичных и вторичных критериев эффективности терапии, описанных в разделе 2.2.3, составил 0,74. Было решено для расчёта выборки принять умеренный размер эффекта (Cohen's d = 0,7). При использовании двустороннего t-критерия с помощью программы G*Power 3.1.9.7 для сравнения двух независимых групп, заданной статистической мощности 80 % и уровне значимости $\alpha = 0,05$, минимальный необходимый объём выборки составил по 34 пациента в каждой группе (всего 68 пациентов).

Таким образом, с учётом возможного выбывания, в выборку, набранную на пилотном этапе, было дополнительно включено 11 пациентов для повышения статистической мощности и надёжности результатов, что сформировало общую выборку из 71 пациента возрастом 104,0 (57,5; 168,0) сут, массой 5,67 (4,60; 6,60) кг и ростом $(60,76 \pm 7,93)$ см. Подробные характеристики пациентов представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Базовые характеристики общей выборки пациентов (n = 71)

Показатель	Значение
Возраст (дни)	104,0 (57,5; 168,0)
Масса (кг)	5,67 (4,60; 6,60)
Рост (см)	60,76 ± 7,93
Пол (муж)	34 (47,9 %)
ВПС с гипертонией МКК (%)	49 (69,0 %)
Дыхательная недостаточность	43 (60,56 %)
Длительность ИК (мин)	50,0 (43,0; 70,5)
Длительность пережатия аорты (мин)	29,0 (24,0; 41,5)

Для описания ультразвуковой семиотики патологических изменений в лёгких у детей с ОДН, выявления взаимосвязи клинических и инструментальных данных с ОДН и оценки их диагностической ценности, было выполнено исследование, включающее 3 этапа. На первом этапе производился сбор данных. На втором этапе выполнялось определение наличия или отсутствия ОДН перед переводом в профильное отделение (первичная конечная точка). На третьем этапе осуществлялась статистическая обработка данных и формирование результатов исследования (Рисунок 17).



Примечание: Этап 1 – Сбор данных. Этап 2 – Определение наличия или отсутствия ОДН перед переводом в профильное отделение (4 оценочный период). Этап 3 – Статистическая обработка данных и формирование результатов исследования.

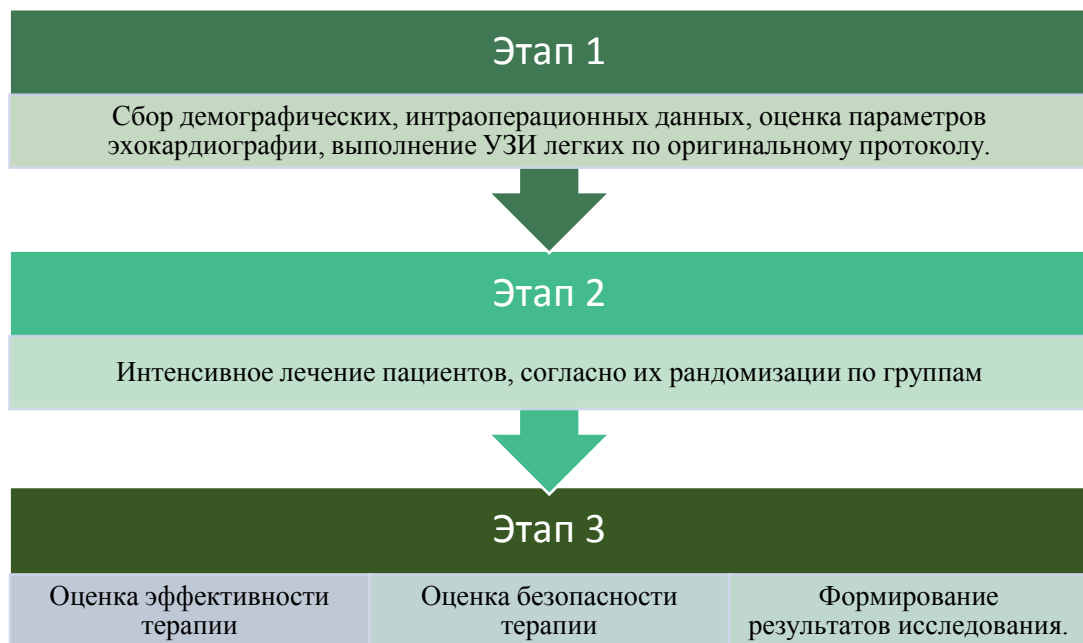
Рисунок 17 – Блок-схема дизайна исследования для описания ультразвуковой семиотики патологических изменений в лёгких у детей с ОДН, выявления взаимосвязи клинических и инструментальных данных с ОДН и оценки их диагностической ценности

Для оценки эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики ОДН было выполнено исследование, включающее 3 этапа. На первом этапе производился сбор необходимых данных. На втором этапе производилось интенсивное лечение пациентов, согласно их рандомизации: все 11 пациентов, дополнительно включенных на заключительном этапе к 60 пациентам, набранных на пилотном этапе, были также подвергнуты рандомизации по описанному ранее принципу. В итоге общая выборка была рандомизирована на 2 группы по типу интенсивной терапии: к группе 0, из пилотного этапа исследования, было добавлено 8 пациентов, таким образом была образована группа 2 (исследуемая, $n = 34$) – интенсивное лечение осуществлялась под контролем УЗИ лёгких. К группе 1, из пилотного этапа исследования, было

добавлено 3 пациента, таким образом была образована группа 3 (контрольная, n = 37) – группа интенсивной терапии без контроля УЗИ лёгких. Результаты проведенного УЗИ лёгких дежурному врачу-реаниматологу не сообщались, рекомендации не выдавались.

Различия в тактике интенсивной терапии будут подробно описаны в разделе 2.3.

На третьем этапе производилась оценка эффективности и безопасности интенсивной терапии и формирование результатов исследования (Рисунок 18).



Примечание: Этап 1 – Сбор данных. Этап 2 – Интенсивное лечение пациентов, согласно их рандомизации по группам. Этап 3 – Оценка эффективности и безопасности интенсивной терапии и формирование результатов исследования.

Рисунок 18 – Блок-схема дизайна исследования для оценки эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики

ОДН

2.2.1 Сбор данных для описания ультразвуковой семиотики патологических изменений в лёгких у детей с острой дыхательной недостаточностью, выявления взаимосвязи клинических и инструментальных данных с острой дыхательной недостаточностью и оценки их диагностической ценности

Демографические и интраоперационные данные. В базе данных фиксировались: масса ребенка в кг, рост в см, возраст в днях, пол, время искусственное кровообращение в мин., время окклюзии аорты в мин., общий индексированный гидробаланс (сумма интраоперационного гидробаланса и реанимационного гидробаланса) в мл/кг, тип ВПС по характеру влияния на легочный кровоток (с гиперволемией малого круга кровообращения (МКК) или без гиперволемии) (Таблица 3).

Таблица 3 – Характеристика включенных пациентов согласно типу ВПС по характеру влияния на легочный кровоток

ВПС с гиперволемией МКК	ВПС без гиперволемии МКК
ДМПП	КСЛА
ДМЖП	Стеноз легочной артерии (комбинированный)
ДМЖП, ДМПП	Клапанный стеноз аорты
ДМЖП, ОАП, ООО	Недостаточность митрального клапана
ДМЖП, ООО	Коарктация аорты
ДМЖП, ОАП	Аномальное отхождение левой коронарной артерии от легочной артерии
Примечание: ВПС – врожденный порок сердца, МКК – малый круг кровообращения, ДМПП – дефект межпредсердной перегородки, ДМЖП – дефект межжелудочковой перегородки, ОАП – открытый артериальный проток, ООО – открытое овальное окно, КСЛА – клапанный стеноз легочной артерии.	

Показатели эхокардиографии: фракция выброса левого желудочка в %, индекс конечно-диастолического объема левого желудочка в мл/м² на 2 и

4 оценочных периодах, систолическое давление в легочной артерии на 4 оценочном периоде. Эхокардиография проводилась специалистами функциональной диагностики с помощью аппарата Philips CX50 (Philips, Нидерланды).

Лабораторные данные. Производился забор артериальной крови для дальнейшего расчета индекса PaO_2/FiO_2 на 4 оценочном периоде.

Ультразвуковое исследование лёгких. Для описания ультразвуковой семиотики патологических изменений в лёгких у детей с ОДН и выявления взаимосвязи клинических и инструментальных данных с ОДН и оценки их диагностической ценности, УЗИ лёгких проводилось на 4 оценочном периоде. УЗИ лёгких проводилось по оригинальному протоколу и методикам, подробно описанным в разделе 2.1.1 для оценки интерстициального синдрома, синдрома альвеолярной консолидации, воздушных бронхограмм, локального В+ синдрома, плеврального выпота, пневмоторакса и характера движения диафрагмы. Дополнительно производился расчет суммы баллов интерстициального синдрома путем суммации полученных баллов в каждой из двенадцати зон лёгких с фиксацией в базе данных как «sBLines_Sum», расчет суммы баллов синдрома альвеолярной консолидации путем суммации сумм полученных баллов в каждой из двенадцати зон лёгких с фиксацией в базе данных как «sConsolidations_Sum», подсчет количества зон лёгких с альвеолярными консолидациями с динамическими бронхограммами «sAirBronchograms_dynamic», количества зон лёгких с альвеолярными консолидациями с статическими бронхограммами «sAirBronchograms_static» и количества зон лёгких с альвеолярными консолидациями, но без наличия воздушных бронхограмм «sAirBronchograms_absence». Также производился расчет суммы баллов локального В+ синдрома путем суммации всех зон лёгких, в которых он выявлялся (из двенадцати зон в обоих лёгких) с фиксацией в базе данных как «sLocalBSyndrome_Sum».

Алгоритм перевода пациента из отделения реанимации и обоснование выбора критериев ОДН подробно описаны в разделе 2.1.2.

Критерии ОДН подробно описаны в разделе 2.1.3.

2.2.2 Сбор данных для оценки эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики острой дыхательной недостаточности

Демографические и интраоперационные данные. В базе данных фиксировались: масса ребенка в кг, рост в см, возраст в днях, пол, время искусственное кровообращение в мин., время окклюзии аорты в мин., интраоперационный индексированный гидробаланс в мл/кг, тип ВПС по характеру влияния на легочный кровоток (с гиперволемией малого круга кровообращения (МКК) или без гиперволемии) (см. Таблицу 3).

Показатели эхокардиографии: фракция выброса левого желудочка в % и индекс конечно-диастолического объема левого желудочка в мл/м² на 1 оценочном периоде.

Лабораторные данные. Производился забор артериальной крови для дальнейшего расчета индекса PaO₂/FiO₂ на 1, 3 и 4 оценочных периодах. Производилась оценка уровня креатинина в мкмоль/л и уровня мочевины в ммоль/л на 4 оценочном периоде. Биохимический состав крови определялся с помощью аппарата Furuno SA-400 (Furuno Electric Co., Ltd., Япония).

Ультразвуковое исследование лёгких. Для оценки эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики ОДН, УЗИ лёгких проводилось на 1, 3 и 4 оценочных периодах по оригинальному протоколу и методикам, подробно описанным в разделе 2.1.1 для оценки интерстициального синдрома, синдрома альвеолярной консолидации, воздушных бронхограмм, локального В+ синдрома, плеврального выпота, пневмоторакса и характера движения диафрагмы. Производился расчет суммы баллов интерстициального синдрома, синдрома альвеолярной консолидации, локального В+ синдрома и различных типов воздушных бронхограмм, как описано в разделе 2.2.1. Дополнительно оценивалась выраженность интерстициального синдрома в каждом легком отдельно путем суммации баллов всех зон: интерстициальный синдром легкой степени (до 6 баллов включительно в одном легком), средней

степени (от 7 до 12 баллов включительно), тяжелой степени (от 13 до 18 баллов включительно), крайне тяжелой степени (от 19 до 24 баллов).

Алгоритм перевода пациента из отделения реанимации и обоснование выбора критериев ОДН подробно описаны в разделе 2.1.2.

Критерии ОДН подробно описаны в разделе 2.1.3.

Группы интенсивной терапии. Группа 2 (исследуемая группа, 34 пациента) – группа интенсивной терапии под контролем УЗИ лёгких. Интенсивная терапия в послеоперационном периоде осуществлялась с учетом данных УЗИ лёгких, и проводился УЗИ контроль в динамике. УЗИ лёгких у исследуемой группы в послеоперационном периоде проводилось минимум трижды: на 2 оценочном периоде, через 2–4 часа после начала терапии и после экстубации трахеи. Количество и частота УЗИ лёгких в данной группе ограничены не были. Результаты данных дополнительных исследований, выполненных вне оценочных периодов исследования, в базу данных не вносились.

Группа 3 – (контрольная группа, 37 пациентов) – УЗИ лёгких для выбора и динамического контроля лечения не выполнялось. Интенсивная терапия проводилась, исходя из данных объективного осмотра, лабораторных и инструментальных данных, исходного типа ВПС, характера выполненного оперативного вмешательства, опыта дежурного врача-реаниматолога. Результаты проведенного УЗИ лёгких дежурному врачу-реаниматологу не сообщались, рекомендации не выдавались.

Дополнительные данные, необходимые для оценки эффективности и безопасности проводимой интенсивной терапии: продолжительность ИВЛ (часы), продолжительность пребывания в отделении анестезиологии и реанимации (реанимационный койко-день). Частота и характер зафиксированных послеоперационных осложнений с распределением на группы: случаи клинической смерти с успешной сердечно-легочной реанимацией, нарушения ритма сердца, неврологические осложнения, постинтубационный отек гортани.

Критерии эффективности и безопасности интенсивной терапии описаны в разделе 2.2.3.

2.2.3 Критерии эффективности и безопасности интенсивной терапии

Оценка эффективности проводилась на 3 и 4 оценочных периодах, оценка безопасности проводилась на 4 оценочном периоде.

Для объективной оценки эффективности и безопасности персонализированной интенсивной терапии, основанной на данных УЗИ лёгких, были заранее определены следующие критерии, использовавшиеся для расчета необходимого объёма выборки:

1) первичный критерий эффективности, имеющий основное значение для оценки терапевтического эффекта:

- частота развития ОДН (количество пациентов, %), регистрируемая на 4 оценочном периоде, определяемая по объективным критериям, описанным в разделе 2.1.3, после 10-минутного теста спонтанного дыхания атмосферным кислородом;

2) вторичные критерии эффективности:

- индекс PaO_2/FiO_2 , оцениваемый на 3 оценочном периоде и 4 оценочном периоде после выполнения теста 10-минутного спонтанного дыхания атмосферным кислородом;

- сумма баллов выраженности интерстициального синдрома (методика оценки описана в разделе 2.2.1.) по 12-зонному УЗИ-протоколу, описанному в разделе 2.1.1. на 3 и 4 оценочных периодах;

- сумма баллов выраженности синдрома альвеолярной консолидации (методика оценки описана в разделе 2.2.1.) по 12-зонному УЗИ-протоколу, описанному в разделе 2.1.1. на 3 и 4 оценочном периоде.

Дополнительные вторичные критерии эффективности, не участвовавшие в расчёте мощности исследования:

- продолжительность ИВЛ (часы);
- продолжительность пребывания в отделении анестезиологии и реанимации (реанимационный койко-день).

Для оценки безопасности интенсивной терапии под контролем УЗИ лёгких

заранее были выбраны критерии, не участвовавшие в расчёте мощности исследования:

1) частота и характер послеоперационных осложнений (нарушения ритма сердца, неврологические осложнения, постинтубационный отек гортани, случаи клинической смерти с успешной сердечно-легочной реанимацией);

2) лабораторные показатели, отражающие безопасность проводимой терапии: уровень креатинина и мочевины, фиксируемые на 4 оценочном периоде, для оценки влияния терапии, подробно описанной в разделе 2.3.2 на почечную функцию, в частности, для выявления возможной нефротоксичности, связанной с назначением фуросемида.

2.3 Протоколы интенсивной терапии

2.3.1 Общие принципы

Диагностика и интенсивное лечение детей с ВПС осуществлялась согласно клиническим рекомендациям по ведению детей с ВПС [3].

С момента поступления пациента в кардиохирургическое отделение до индукции анестезии, лечебными мероприятиями руководил лечащий врач-кардиолог. Лечащий врач-кардиолог не был осведомлен о результате распределения пациента в исследуемую или контрольную группы, а также о результатах проведенного УЗИ лёгких. Терапия назначалась исходя из типа ВПС, клинической ситуации, а также клинического опыта лечащего врача-кардиолога и не могла повлиять на ход дальнейшего исследования.

С момента индукции анестезии и до поступления пациента из операционной в палату интенсивной терапии, терапевтические мероприятия, выбор режима и параметров ИВЛ, кардиотонической поддержки, инфузионной и трансфузионной терапии, осуществлялось врачом-анестезиологом исходя из типа ВПС, клинической ситуации, а также клинического опыта врача. Дополнительных специальных мероприятий, направленных на коррекцию ультразвуковой картины,

в ходе проведения анестезиологического пособия, не проводилось.

Анестезиологическое обеспечение осуществлялось в соответствии с клинической практикой, принятой в Федеральном центре сердечно-сосудистой хирургии г. Красноярска, на основе рекомендаций, описанных в современном клиническом руководстве по анестезиологии [17]. Индукция анестезии проводилась внутривенным введением фентанила (2 мкг/кг), пропофола (2 мг/кг) и рокурония (0,6 мг/кг) при наличии предустановленного периферического катетера, либо с использованием севофлурана (3,5–5,0 об %) через лицевую маску с последующим введением фентанила (2 мкг/кг) и рокурония (0,6 мг/кг) после установки периферического катетера. Интубация трахеи производилась с помощью прямой ларингоскопии интубационной трубкой без манжеты с индивидуальным подбором ее размера. Поддержание анестезии осуществлялось севофлураном в концентрации 0,8–1,5 МАС (Minimum Alveolar Concentration) на фоне инфузии фентанила (3–5 мкг/кг/ч) и инфузии рокурония (0,6 мг/кг/ч). По окончании операции пациент переводился в ОАРд на фоне продолжающейся ИВЛ и сохраняющегося угнетения сознания. Экстубация на операционном столе не производилась.

В процессе анестезиологического пособия осуществлялся непрерывный мониторинг: электрокардиографии, инвазивного артериального давления, центрального венозного давления, перкутанной сатурации, ректальной температуры тела, капнограммы, а также концентрации севофлурана и кислорода в дыхательной смеси. У пациентов с коарктацией аорты дополнительно проводилась ближняя инфракрасная спектроскопия (Near Infrared Spectroscopy, NIRS) с использованием церебрально-соматического оксиметра Medtronic INVOS™ 5100C (Medtronic plc, Ирландия).

Искусственная вентиляция лёгких в операционной проводилась с помощью наркозного аппарата Dräger Primus (Drägerwerk AG & Co. KGaA, Германия) в режиме принудительной вентиляции с контролем по давлению (PCV), параметры устанавливались индивидуально, с учётом типа ВПС, характера хирургического вмешательства, исходного состояния пациента, показателями гемодинамики и

газообмена: давление на вдохе устанавливалось для достижения дыхательного объема 6–8 мл/кг массы тела, частота дыхания 20–45 в мин, FiO_2 25–60 %, ПДКВ 3–5 см H_2O , соотношение вдоха к выдоху (I : E) устанавливалось как 1 : 2.

Искусственное кровообращение осуществлялось по стандартной, принятой в отделении, методике с помощью аппарата Stockert S5 (LivaNova PLC, Германия). Объемная скорость перфузии подбиралась исходя из площади поверхности тела, умноженной на перфузионный индекс. Использовалась кровяная холодовая кардиоплегия, приготовленная по стандартной для отделения методике, выполняемая по принятой стандартной схеме, с циклами повторения каждые 20 минут при температуре кардиopleгического раствора 4,5 градуса. Температурный режим пациента выбирался исходя из типа коррекции ВПС, а также клинической ситуации. В процессе проведения ИК проводилась ультрафильтрация. После выполнения основного этапа операции, в постперфузионном периоде выполнялась модифицированная артерио-венозная ультрафильтрация.

Тактика оперативного вмешательства выбиралась оперирующим кардиохирургом исходя из клинических рекомендаций, типа ВПС, клинической ситуации, собственного опыта. Оперирующий хирург не был осведомлен о результате распределения пациента в исследуемую или контрольную группы, а также о результатах проведенного УЗИ лёгких.

Всем пациентам в послеоперационном периоде проводилась стандартная интенсивная терапия, включающая:

1) поддержание гемодинамики: кардиотоническая, вазоактивная терапия. Препарат и дозировка подбирались индивидуально, в зависимости от данных чреспищеводной и трансторакальной эхокардиографии, показателей гемодинамики, типа ВПС и интраоперационных данных, клинической ситуации. Использовались следующие кардиотонические препараты: допамина гидрохлорид, адреналин, левосимендан. Вазоактивные препараты: нитроглицерин в титруемых дозировках;

2) респираторную поддержку. В условиях операционной респираторная

поддержка осуществлялась с помощью наркозного аппарата Dräger Primus (Drägerwerk AG & Co. KGaA, Германия) в режиме PCV. В условиях ОАРд с помощью аппарата ИВЛ Maquet Servo-i (Getinge Group, Швеция) в режиме PCV и режиме CPAP с поддержкой давлением (Pressure Support) в соответствии с клинической ситуацией;

3) седативную и анальгетическую терапию. Всем пациентам в раннем послеоперационном периоде, находившимся в ОАРд, проводилась седативная терапия пропофолом в инфузионной дозе от 0,5 до 5 мг/кг/ч, титруемой по эффекту с целью достижения целевого уровня умеренной седации согласно классификации, описанной в статье [2]. При этом необходимо отдельно отметить, что при такой седации ребёнок находится в состоянии сонливости, но сохраняет адекватный ответ на резкие звуковые раздражители или лёгкую тактильную стимуляцию. Спонтанное дыхание, проходимость дыхательных путей, кашлевой рефлекс и гемодинамика остаются стабильными и не требуют специальных вмешательств. На болевое раздражение отмечается нецеленаправленная защитная реакция. Применение седации у детей грудного возраста являлось клинически необходимым в связи с рядом факторов: наличием риска гемодинамической и респираторной нестабильности при резком пробуждении, некомплаентностью, неосуществимостью длительного нахождения в лежачем положении без эмоционального и двигательного беспокойства, необходимостью синхронизации с аппаратом ИВЛ, проведением рекрутмент маневров, а также обеспечения устойчивого положения тела при выполнении постуральных манипуляций для дренирования бронхиального дерева и коррекции ателектазов. Анальгетическая терапия в послеоперационном периоде проводилась при появлении клинических признаков болевого синдрома, включающих беспокойство, плач, гримасничанье, повышение частоты сердечных сокращений и дыхания, нарушение сна и мышечную ригидность. В качестве препарата первой линии использовался парацетамол в дозе 15 мг/кг, вводимый внутривенно с кратностью до 4 раз в сутки на фоне проводимой седации. Решение о начале, дозировке и частоте введения принималось лечащим врачом на основании динамической клинической оценки

состояния пациента. Опиоидные анальгетики в плановом порядке в исследуемой когорте не применялись, тем самым исключалось их потенциальное влияние на дыхательный центр и оценку респираторного статуса;

4) коррекцию водно-электролитного и кислотно-основного баланса, анализов крови при необходимости;

5) антибактериальную профилактику.

Применялись общепринятые принципы управления кровообращением и дыханием, рекомендованные в современных клинических руководствах по анестезиологии и интенсивной терапии у детей с ВПС [5, 17]. Полная стандартизация анестезиологического пособия и интенсивной терапии в данной когорте не представлялась возможной ввиду как гетерогенности патофизиологических механизмов, лежащих в основе различных форм ВПС, так и в силу индивидуальных особенностей каждого пациента, включая исходное состояние, сопутствующую патологию, реакцию на хирургическую агрессию, а также особенности интраоперационного периода (включая продолжительность операции, времени ИК и окклюзии аорты).

Общие принципы анестезиологического пособия и интенсивной терапии были одинаковы для всех пациентов и не зависели от их принадлежности к исследуемой или контрольной группе.

2.3.2 Специфическая терапия под контролем ультразвукового исследования лёгких

Лечение интерстициального синдрома проводилось в зависимости от его степени выраженности, определяемой по результатам УЗИ. Терапевтические меры включали диуретическую терапию, коррекцию объема инфузионной терапии и поддержание нормального уровня общего белка в крови. При выявлении интерстициального синдрома легкой степени коррекция терапии не проводилась. Пациенты находились под динамическим наблюдением с контролем водно-электролитного баланса. Контрольное УЗИ лёгких выполняется спустя

2–4 часа после начала терапии и после экстубации трахеи. При более выраженных формах интерстициального синдрома применялась дробная внутривенная диуретическая терапия фуросемидом в дозировке 0,2–0,4 мг/кг с ультразвуковым контролем в динамике, при необходимости проводилось его непрерывное введение с постепенным увеличением дозировки до максимальной 1 мг/кг/ч. Коррекция дозировки осуществлялась с учетом клинической картины, показателей диуреза, гидратационного статуса пациента и данных УЗИ лёгких. Гипоальбуминемия способствует развитию интерстициального отека лёгких за счет снижения онкотического давления плазмы. Для предупреждения этого осложнения при тяжелой и крайне тяжелой степени интерстициального синдрома проводилась инфузионная терапия альбумином с целью поддержания адекватного уровня общего белка.

При наличии синдрома альвеолярной консолидации применялись следующие методы интенсивной терапии: рекрутмент-маневры, установка оптимального уровня ПДКВ при проведении ИВЛ, позиционирование пациента и вибрационный массаж грудной клетки с обеспечением адекватной санации трахеобронхиального дерева (ТБД). Рекрутмент-маневр проводился под контролем УЗИ по модифицированной нами методике [108] путем ручного ступенчатого повышения уровня ПДКВ с начального уровня, который установлен при поступлении пациента из операционной, с шагом в 5 см H₂O и задержкой на каждом уровне повышения на 10 аппаратных вдохов. Повышение уровня ПДКВ производится до 15 см H₂O с последующим снижением ПДКВ до индивидуально установленного уровня для каждого пациента. Так как есть данные, что ПДКВ может негативно влиять на лимфатический дренаж паренхимы легкого и приводить к увеличению в ней внесосудистой жидкости [7], базисный уровень ПДКВ подбирался индивидуально: 5 см H₂O – при отсутствии альвеолярных консолидаций, 6 см H₂O – при суммарной балльной оценке консолидаций от 1 до 8, при сумме более 8 баллов устанавливался уровень ПДКВ 7 см H₂O. В случаях уменьшения размеров консолидаций по данным УЗИ (рекрутабельности участков легкого), рекрутмент-маневр повторялся при каждом отсоединении

дыхательного контура. Выполнялось позиционирование пациента и вибрационный массаж с учетом выявленных зон с наиболее выраженным синдромом альвеолярной консолидации. При снижении или повышении баллов альвеолярных консолидаций в динамике, происходила коррекция уровня ПДКВ по принципу, описанному выше. После экстубации трахеи проведение рекрутмент-маневров, санации ТБД, а также установка ПДКВ невозможны. При выявлении зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации проводилось позиционирование пациента и вибрационный массаж грудной клетки, выполнялись санации верхних дыхательных путей (ВДП) со стимуляцией кашлевого рефлекса.

Тактика лечения плеврального выпота зависела от его объема. При значении менее 5 мл/кг (малый плевральный выпот) использовалась консервативная тактика (петлевые диуретики и ограничение инфузионной терапии) с последующим УЗИ-контролем. При объеме 5–10 мл/кг (умеренный плевральный выпот) решение о дренировании принималось исходя из выраженности ОДН и клинического состояния пациента, проводилась консультация детского кардиохирурга для обсуждения целесообразности дренирования плевральной полости. При более значительных объемах (массивный плевральный выпот) выполнялось дренирование плевральной полости.

При выявлении малого пневмоторакса проводилась оценка его объема в динамике. При выявлении умеренного и массивного пневмоторакса выполнялось дренирование плевральной полости.

При выявлении аномалий движений диафрагмы проводилась консультация детского кардиохирурга для решения вопроса о проведении ее пликаций. Стоит отметить, что пликация диафрагмы в нашем исследовании не выполнялась ни в одном случае.

В рамках исследования рентгенография органов грудной клетки не использовалась для верификации выявленных ультразвуковых синдромов. При выявлении пневмоторакса, требующего дренирования, решение о проведении

контрольной рентгенографии принималось консультирующим детским кардиохирургом на основании клинической ситуации.

2.3.3 Терапия в контрольной группе

После перевода пациента из операционной в ОАРД интенсивная терапия в группе контроля осуществлялась согласно клиническим рекомендациям по ведению пациентов с врожденными пороками сердца [3], клинических, лабораторных и инструментальных данных, включая рентгенографию и эхокардиографию (ЭхоКГ), опыту дежурного врача-реаниматолога, без учета данных УЗИ лёгких. Результаты УЗИ лёгких не сообщались лечащему врачу-реаниматологу и не влияли на выбор тактики лечения.

2.4 Статистическая обработка данных

2.4.1 Общие принципы статистического анализа

Накопление и первичный анализ данных проводили в написанной нами на языке программирования C# программе (интерфейсе), облегчающей взаимодействие с базой данных SQLite и формирующей файлы (книги) Excel. Статистический анализ данных проводился с использованием программного обеспечения Python (версия 3.12.0) и следующих библиотек: pandas, numpy, scipy, statsmodels, sklearn, seaborn, matplotlib, joblib, docx, sqlite3. Все данные предварительно экспортировались из электронной базы данных SQLite в файлы (книги) Excel.

При нормальном распределении данные были представлены средним значением и стандартным отклонением $M \pm SD$. Описание количественных данных, не подчиняющихся закону нормального распределения, представляли в виде $Me (Q1; Q3)$, где Me – медианное значение, $Q1$ – первый квартиль (25-й процентиль), $Q3$ – третий квартиль (75-й процентиль). Частотные данные

представлены в формате $N (\%)$, где N – абсолютное количество наблюдений в группе, а $\%$ – процент числа наблюдений в группе.

Нормальность распределения полученных данных оценивалась с использованием критерия Шапиро – Уилка. Для сравнительного анализа количественных независимых переменных, распределение которых отличалось от нормального, был применен непараметрический U -критерий Манна – Уитни. Для параметров, распределение которых соответствовало нормальному, сравнительный анализ количественных независимых переменных проводился с использованием t -критерия Стьюдента. Для сравнения категориальных признаков – критерий χ^2 или точный тест Фишера (при ожидаемой частоте в ячейке < 5). Уровень статистической значимости для всех тестов принят за $p < 0,05$.

2.4.2 Статистический анализ для создания прогностической модели и выявления независимых предикторов развития острой дыхательной недостаточности

Обработка данных, описание количественных и категориальных переменных, а также их сравнительный анализ выполнялись в соответствии с методологией, изложенной в разделе 2.4.1. Обработка данных, построение предиктивных моделей (ММО и МЛР), статистический анализ данных, исследование эффективности построенных предиктивных моделей и визуализация данных осуществлялись с применением программных алгоритмов, написанных на языке программирования Python (Python Software Foundation, Version 3.12.0, Wilmington, DE: Python Software Foundation) с использованием всех библиотек, перечисленных в разделе 2.4.1.

Для создания прогностической модели на основе машинного обучения (ММО) использовался метод Random Forest –ансамблевый метод, основанный на множестве деревьев решений. Каждое дерево обучается на случайной подвыборке данных и признаков, что снижает риск переобучения по сравнению с отдельными деревьями решений. Ансамблирование деревьев решений позволяет улучшить

качество прогнозов за счет усреднения результатов нескольких моделей, эффективно работать с нелинейными взаимосвязями между признаками, небольшими выборками и разнородными данными.

Все пациенты ($n = 60$) были разделены на 3 независимые подвыборки с помощью рандомизации: для обучения – 42 пациента (70 %), калибровки модели – 6 пациентов (10 %) и тестирования модели – 12 пациентов (20 %). Случайное разделение пациентов на обучающую, калибровочную и тестовую подвыборки с отсутствием статистически значимых различий по базовым характеристикам пациентов, включая основной класс (пациенты с ОДН), обеспечивает высокую представительность каждой подвыборки, минимизирует предвзятость, уменьшает риск переобучения и повышает достоверность результатов исследования.

Проводилось обучение модели и ее калибровка на отдельных подвыборках с дальнейшей фиксацией и сохранением модели. Калибровочная подвыборка использовалась для настройки гиперпараметров ММО. Оценка калибровки ММО выполнялась с помощью расчета Brier Score. Далее выполнялось тестирование модели на тестовой подвыборке без кросс-валидации с выполнением ROC-анализа по трем точкам с расчетом AUC. Для более глубокой оценки эффективности созданной предиктивной модели ММО проводилась кросс-валидация методом Monte-Carlo с 1 000 итераций. Метрики оценки прогностической модели рассчитывались для каждого разбиения, а итоговая оценка определялась как среднее значение метрик по всем итерациям. Показателями эффективности (performance) моделей были следующие общепризнанные метрики: accuracy (точность), recall (полнота), specificity (специфичность), precision (точность предсказания), F1-мера. Метрики рассчитывались с использованием Confusion Matrix (матрицы ошибок), где выделялись истинно положительные, истинно отрицательные, ложно положительные и ложно отрицательные значения.

Также была создана предиктивная модель на основе логистической регрессии (МЛР) с обучением модели и ее тестированием на отдельных подвыборках. Был выполнен однофакторный и многофакторный регрессионные

анализы, создано уравнение логистической регрессии. Далее выполнялось тестирование модели на тестовой подвыборке с выполнением ROC-анализа с расчетом AUC. Для глубокой оценки эффективности модели логистической регрессии проводилась кросс-валидация Monte-Carlo с 1 000 итераций. В качестве оценки эффективности модели использовались аналогичные метрики. Метрики рассчитывались с использованием матрицы ошибок.

Выбор методологии Random Forest с разбиением данных на три подвыборки (обучение, калибровка, тестирование) с фиксацией модели и с последующей калибровкой и проведением кросс-валидации обусловлен следующими факторами: ограниченный объем данных (60 пациентов), необходимость получения надежных и интерпретируемых результатов, важность оценки вероятностных прогнозов и их калибровки, требования к стабильности и точности модели. Эта методология обеспечивает баланс между качеством модели и возможностями исследования с ограниченной выборкой данных.

Для выявления 5 наиболее прогностически ценных независимых предикторов, был проведен ROC-анализ, выполнен расчет AUC, чувствительности, специфичности, отношение шансов (ОШ) и его 95 % доверительный интервал (95 % ДИ), пороговое значение переменных.

2.4.3 Статистический анализ для описания ультразвуковой семиотики патологических изменений в лёгких у детей с острой дыхательной недостаточностью

Для выполнения описательной статистики производился отбор пациентов по значению бинарной переменной «RespiratoryFailure_4» = 1 (пациенты с ОДН). Обработка данных, описание количественных и категориальных переменных выполнялись в соответствии с методологией, изложенной в разделе 2.4.1. Также определялись максимальное и минимальное значения каждой переменной. Визуализация описательной части исследования проводилась с помощью violin plots (скрипичных диаграмм), которые позволяют отобразить плотность

распределения данных, медиану и межквартильный размах.

2.4.4 Статистический анализ для выявления взаимосвязи клинических и инструментальных данных с острой дыхательной недостаточностью и их диагностической ценности

Для оценки связи между количественными переменными и бинарной зависимой переменной «RespiratoryFailure_4» (ОДН) использовалась точечно-бисериальная корреляция (point-biserial correlation). Рассчитывались коэффициенты корреляции и соответствующие p-value. Для оценки связи между бинарной зависимой переменной (ОДН) и множеством порядковых независимых переменных был использован коэффициент ранговой корреляции (rank-biserial correlation). При анализе взаимосвязи параметров использовали шкалу интерпретации силы корреляционной связи [127]:

$0 < r < 0,2$ – очень низкая корреляция;

$0,2 < r < 0,4$ – низкая корреляция;

$0,4 < r < 0,6$ – средняя корреляция;

$0,6 < r < 0,8$ – высокая (сильная) корреляция;

$0,8 < r < 1,0$ – очень высокая (очень сильная) корреляция.

Для всех коэффициентов корреляции рассчитывались p-value. Также в связи с тем, что размер выборки был на 20 % больше необходимого минимума, который рассчитывался для надежного выявления коэффициентов корреляции от 0,4 (средняя корреляция) и выше, для каждого коэффициента корреляции была дополнительно рассчитана мощность с использованием t-статистики методом post-hoc. Мощность оценивалась на основе размера выборки ($n = 71$) и уровня значимости $\alpha = 0,05$. Коэффициенты с мощностью $\geq 0,8$ считались надежными ($r > 0,32$).

Далее был выполнен однофакторный логистический регрессионный анализ с расчетом коэффициентов регрессии и их p-value (тест Вальда), отношения шансов (ОШ), псевдо- R^2 (МакФаддена). Для переменных со статистически

значимыми коэффициентами, а также значением псевдо- R^2 МакФаддена $\geq 0,2$ (умеренное влияние на бинарную переменную), был выполнен ROC-анализ с расчетом порогового значения, AUC, чувствительности и специфичности.

Для наглядного представления результатов корреляционного анализа были построены тепловые карты корреляций. На тепловых картах статистически значимые коэффициенты были выделены рамками: $p < 0,05$ – квадратная рамка – [], $p < 0,01$ – круглая рамка – (), а коэффициенты с высокой мощностью ($\geq 0,8$) были дополнительно помечены звездочками – *.

Обработка данных, описание количественных и категориальных переменных, а также их сравнительный анализ выполнялись в соответствии с методологией, изложенной в разделе 2.4.1.

2.4.5 Статистический анализ для оценки эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких

Эффективность и безопасность интенсивной терапии оценивалась путем сравнения значений первичного и вторичных критериев эффективности между группами, а также путем сравнения значений дополнительных вторичных критериев эффективности и критериев безопасности, подробно описанных в разделе 2.2.3. Обработка данных, описание количественных и категориальных переменных, а также их сравнительный анализ выполнялись в соответствии с методологией, изложенной в разделе 2.4.1.

ГЛАВА 3 СОЗДАНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ВЫЯВЛЕНИЕ НЕЗАВИСИМЫХ ПРЕДИКТОРОВ РАЗВИТИЯ ОСТРОЙ ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ

Базовые характеристики принимавших участие в исследовании пациентов (n = 60) представлены в Таблице 1.

В целях объективной оценки эффективности различных подходов к построению прогностических моделей были рассмотрены два алгоритма: логистическая регрессия (МЛР) и ансамблевый метод машинного обучения Random Forest (ММО).

3.1 Прогностическая модель на основе алгоритма Random Forest

Сравнение базовых характеристик у пациентов в обучающей и тестовой подвыборках представлены в Таблице 4. Сравнение базовых характеристик у пациентов в обучающей и калибровочной подвыборках представлены в Таблице 5. Базовые характеристики пациентов в тестовой подвыборке представлены в Таблице 6. Статистически значимых различий между подвыборками не было.

Обучающая и тестовая подвыборки при обучении и тестировании обеих моделей (ММО и МЛР) были идентичными по объему, включенным пациентам и учитываемым факторам.

Таблица 4 – Сравнение базовых характеристик пациентов обучающей и тестовой подвыборок

Значения	Обучающая подвыборка (n = 42)	Тестовая подвыборка (n = 12)	p-value
Возраст (дни)	120,00 (60,50; 186,25)	170,67 ± 104,68	0,382
Масса (кг)	5,97 ± 1,76	6,54 ± 2,37	0,377
Рост (см)	61,10 ± 8,02	64,17 ± 8,65	0,265
Мужской пол, n (%)	22 (52,4)	6 (50,0)	1,000

Продолжение Таблицы 4

Значения	Обучающая подвыборка (n = 42)	Тестовая подвыборка (n = 12)	p-value
ВПС с гиперволемией МКК, n (%)	33 (78,6)	6 (50,0)	0,113
Дыхательная недостаточность, n (%)	25 (59,5)	7 (58,3)	0,442
Продолжительность искусственного кровообращения (мин)	50,00 (43,00; 75,75)	45,00 (38,00; 75,00)	0,755
Продолжительность пережатия аорты (мин)	28,50 (23,25; 43,50)	27,50 (23,50; 40,00)	0,992

Таблица 5 – Сравнение базовых характеристик пациентов обучающей и калибровочной подвыборок

Значения	Обучающая подвыборка (n = 42)	Калибровочная подвыборка (n = 6)	p-value
Возраст (дни)	120,00 (60,50; 186,25)	76,67 ± 26,29	0,078
Масса (кг)	5,97 ± 1,76	5,69 (4,27; 5,70)	0,249
Рост (см)	61,10 ± 8,02	55,67 ± 3,82	0,117
Мужской пол, n (%)	22 (52,4)	3 (50,0)	1,000
ВПС с гиперволемией МКК, n (%)	33 (78,6)	3 (50,0)	0,313
Дыхательная недостаточность, n (%)	25 (59,5)	5 (83,3)	0,499
Продолжительность искусственного кровообращения (мин)	50,00 (43,00; 75,75)	58,00 ± 12,79	0,492
Продолжительность пережатия аорты (мин)	28,50 (23,25; 43,50)	31,33 ± 11,37	0,938

Таблица 6 – Базовые характеристики пациентов тестовой подвыборки.

Значения	Исследуемая группа (n = 6)	Контрольная группа (n = 6)	p-value
Возраст (дни)	191,67 ± 113,29	149,67 ± 90,55	0,532
Масса (кг)	7,12 ± 3,04	5,96 ± 1,14	0,439
Рост (см)	64,50 ± 11,59	63,83 ± 3,89	0,905

Продолжение Таблицы 6

Значения	Исследуемая группа (n = 6)	Контрольная группа (n = 6)	p-value
Мужской пол, n (%)	4 (66,7)	4 (66,7)	0,564
ВПС с гиперволемией МКК, n (%)	4 (66,7)	4 (66,7)	0,564
Дыхательная недостаточность, n (%)	4 (66,7)	5 (83,3)	0,242
Продолжительность искусственного кровообращения (мин)	57,50 (42,50; 66,50)	39,00 (38,00; 84,25)	0,630
Продолжительность пережатия аорты (мин)	27,50 (21,75; 32,50)	27,50 (24,50; 50,75)	0,818
Примечание: Исследуемая группа – группа с интенсивной терапии под контролем УЗИ лёгких, контрольная группа – группа с интенсивной терапией без контроля УЗИ лёгких.			

В результате обучения модели ММО производилась настройка гиперпараметров. С последующей калибровкой на калибровочной подвыборке были настроены следующие гиперпараметры: `n_estimators` (число деревьев в лесу): увеличение числа деревьев может улучшить качество модели, но повышает время обучения, `max_depth` (максимальная глубина дерева): ограничивает глубину дерева для предотвращения переобучения, `min_samples_split` (минимальное число образцов для разделения узла), `min_samples_leaf` (минимальное число образцов в листе), `max_features` (максимальное количество признаков для выбора при делении узла): влияет на случайность модели, `bootstrap` (использование подвыборки с возвращением). Нами были установлены следующие значения гиперпараметров: `n_estimators` равно 100, `max_depth` равно 30, `min_samples_split` равно 5, `min_samples_leaf` равно 2, `bootstrap` установили True. Brier Score составил 0,095. Построена калибровочная кривая (Рисунок 19). Модель была зафиксирована (сохранена). Далее было выполнено тестирование модели на тестовой подвыборке с выполнением ROC-анализа и построением ROC-кривой (Рисунок 20). AUC ММО составила 0,929. Вторым этапом была проведена кросс-валидация сохраненной модели ММО на тестовой подвыборке по методу Monte-Carlo с 1 000 итераций для оценки обобщающей способности заранее

обученной и зафиксированной модели. Исходные 12 тестовых случаев случайным образом разбивались на подмножества в ходе 1 000 итераций, в каждую обучающую подвыборку попадали 9 случаев, а оставшиеся 3 использовались для тестирования, причём модель использовалась исключительно для прогнозирования без повторного обучения, 9 случаев, отобранных для обучающей подвыборки, использовались исключительно для симуляции и проверки модели на согласованность её прогнозов с обучающими данными, а не для обновления параметров модели. Метрики эффективности прогностической модели рассчитывались для каждого разбиения, а итоговая оценка определялась как среднее значение метрик по всем итерациям. Показатели эффективности были следующими: accuracy (точность) – 0,922 (92,2 %), recall (полнота, чувствительность) – 1,0 (100 %), specificity (специфичности) – 0,867 (86,7 %), precision (точность предсказания) – 0,840, F1-меры – 0,913. Результаты представлены в Таблице 8. Построена Confusion Matrix (Рисунок 21).

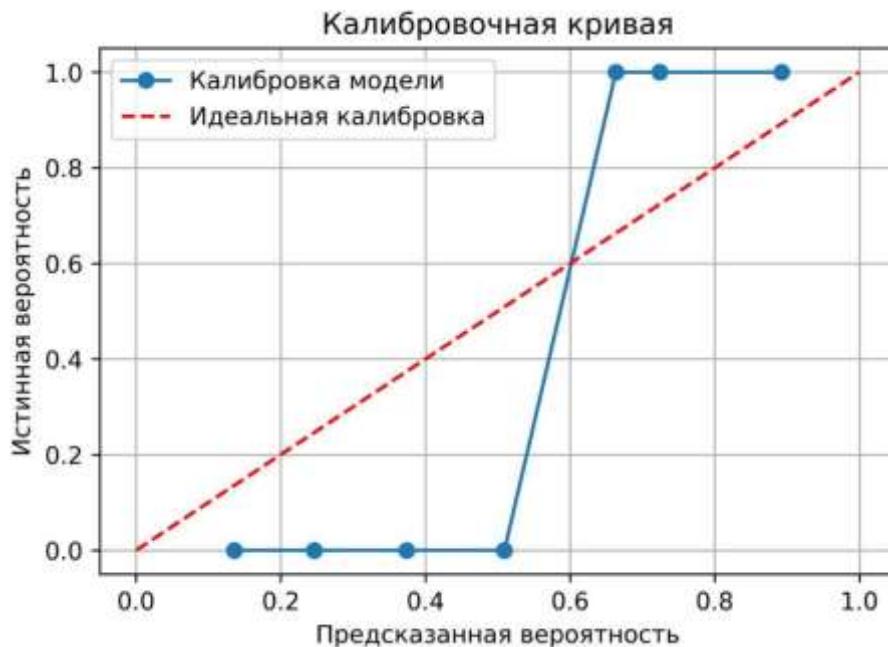


Рисунок 19 – Калибровочная кривая модели ММО (алгоритм машинного обучения). Brier Score 0,095

3.2 Прогностическая модель на основе логистической регрессии

Также была создана вторая прогностическая модель по принципу логистической регрессии (МЛР) с включением тех же пациентов в обучающую (42 пациента) и тестовую (12 пациентов) подвыборку на основе учета тех же факторов, что и при создании ММО. Пациенты из калибровочной подвыборки при создании и тестировании данной модели не использовались. Был проведен однофакторный регрессионный анализ (Таблица 7), выявлено 25 статистически значимых независимых предиктора.

Таблица 7 – Однофакторный регрессионный анализ модели логистической регрессии. Статистически значимые факторы

Фактор	Коэффициент	P-значение	95 % CI (нижняя)	95 % CI (верхняя)
Группа исследования	3,296	0,000	1,860	4,732
Рост пациента	-0,078	0,031	-0,150	-0,007
Возраст пациента	-0,008	0,017	-0,014	-0,001
Боковая верхняя зона левого легкого, интерстициальный синдром (до операции)	0,809	0,026	0,096	1,522
Боковая верхняя зона левого легкого, локальный В+ синдром (после операции)	-1,266	0,029	-2,399	-0,132
Задне-верхняя зона левого легкого, консолидации (после операции)	0,616	0,021	0,091	1,141
Задне-верхняя зона левого легкого, воздушные бронхограммы (после операции)	0,635	0,025	0,080	1,191
Передне-верхняя зона правого легкого, интерстициальный синдром (до операции)	0,719	0,039	0,035	1,403

Продолжение Таблицы 7

Фактор	Коэффициент	P-значение	95 % CI (нижняя)	95 % CI (верхняя)
Боковая верхняя зона правого легкого, интерстициальный синдром (до операции)	0,650	0,033	0,053	1,248
Боковая верхняя зона правого легкого, интерстициальный синдром (после операции)	1,072	0,008	0,274	1,870
Боковая верхняя зона правого легкого, консолидации (после операции)	0,859	0,048	0,009	1,710
Боковая верхняя зона правого легкого, воздушные бронхограммы (после операции)	0,876	0,034	0,065	1,686
Задне-верхняя зона правого легкого, интерстициальный синдром (после операции)	1,295	0,003	0,428	2,162
Задне-верхняя зона правого легкого, консолидации (до операции)	0,632	0,015	0,122	1,142
Задне-верхняя зона правого легкого, консолидации (после операции)	0,965	0,002	0,357	1,574
Задне-верхняя зона правого легкого, воздушные бронхограммы (до операции)	0,579	0,035	0,041	1,118
Задне-верхняя зона правого легкого, воздушные бронхограммы (после операции)	0,824	0,005	0,244	1,403
Боковая нижняя зона правого легкого: консолидации (после операции)	0,694	0,016	0,132	1,257
Боковая нижняя зона правого легкого: локальный В+-синдром (до операции)	-2,015	0,018	-3,679	-0,351
Боковая нижняя зона правого легкого: воздушные бронхограммы (после операции)	0,796	0,012	0,175	1,416

Окончание Таблицы 7

Фактор	Коэффициент	P-значение	95 % CI (нижняя)	95 % CI (верхняя)
Задняя нижняя зона правого легкого: интерстициальный синдром (после операции)	0,695	0,040	0,030	1,360
Задняя нижняя зона правого легкого: консолидации (после операции)	0,845	0,002	0,320	1,369
Задняя нижняя зона правого легкого: воздушные бронхограммы (после операции)	1,099	0,000	0,487	1,710
Правое легкое: интерстициальный синдром (до операции)	0,859	0,016	0,163	1,556
Правое легкое: интерстициальный синдром (после операции)	0,765	0,041	0,030	1,499
Примечание: Консолидации – синдром альвеолярной консолидации (сокращено в Таблице). Статистически значимые факторы определялись при выполнении теста Вальда, если p-value было меньше 0,05. «До операции» – 1 оценочный период, «после операции» – 2 оценочный период.				

Далее был выполнен многофакторный регрессионный анализ, создано уравнение логистической регрессии:

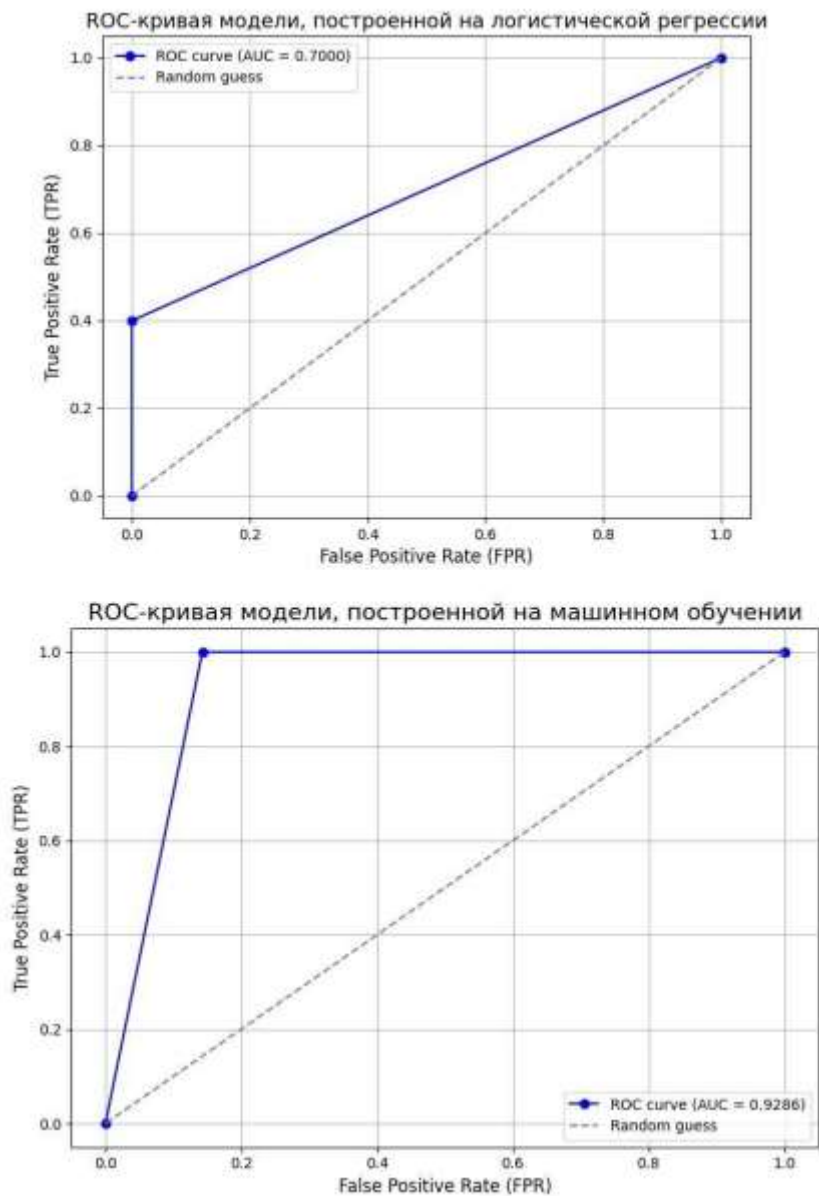
$$\begin{aligned} \text{Logit}(P) = & (-0,8556) + 343,1066 * \text{MainGroup} + 6,2992 * \\ & \text{LeftLungLateralUp_BLines}_0 + (-152,5780) * \text{LeftLungLateralUp_LocalBSyndrome}_1 \\ & + (-20,8457) * \text{LeftLungPosteriorUp_Consolidations}_1 + 49,0374 * \\ & \text{LeftLungPosteriorUp_AirBronchograms}_1 + 4,2821 * \\ & \text{RightLungAnteriorUp_BLines}_0 + 43,7875 * \text{RightLungAnteriorUp_BLines}_1 + \\ & 0,9157 * \text{RightLungLateralUp_BLines}_0 + 45,5332 * \text{RightLungLateralUp_BLines}_1 + \\ & (-65,3959) * \text{RightLungLateralUp_Consolidations}_1 + (-43,1994) * \\ & \text{RightLungLateralUp_AirBronchograms}_1 + 140,8244 * \\ & \text{RightLungPosteriorUp_BLines}_1 + 2,1094 * \text{RightLungPosteriorUp_Consolidations}_0 \\ & + 19,6377 * \text{RightLungPosteriorUp_Consolidations}_1 + 14,4657 * \end{aligned}$$

RightLungPosteriorUp_AirBronchograms_0	+	5,8946	*
RightLungPosteriorUp_AirBronchograms_1	+	16,1164	*
RightLungLateralDown_Consolidations_1	+	(-101,0784)	*
RightLungLateralDown_LocalBSyndrome_0	+	77,5300	*
RightLungLateralDown_AirBronchograms_1	+	11,0685	*
RightLungPosteriorDown_BLines_1	+	(-35,5075)	*
RightLungPosteriorDown_Consolidations_1	+	37,3142	*
RightLungPosteriorDown_AirBronchograms_1	+	27,4746	*
RightLungInterstitialSyndrome_0 + (-31,8331) * RightLungInterstitialSyndrome_1 + (-14,5012) * PatientHeight + 0,9210 * Age			

Выполнено тестирование модели на тестовой подвыборке с выполнением ROC-анализа и построением ROC-кривой (Рисунок 20). AUC МЛР составила 0,70.

Далее была проведена кросс-валидация на тестовой подвыборке по методу Monte-Carlo с 1 000 итераций по принципам идентичным ММО. Важно отметить, что МЛР также не переобучалась в ходе этих итераций. Выполнен расчет accuracy (точности) – 0,742 (74,2 %), recall (полнота, чувствительность) – 0,387 (38,7 %), specificity (специфичности) – 1,000 (100 %), precision (точности предсказания) – 1,000, F1-меры – 0,558 (Таблица 8). Построена Confusion Matrix (Рисунок 21).

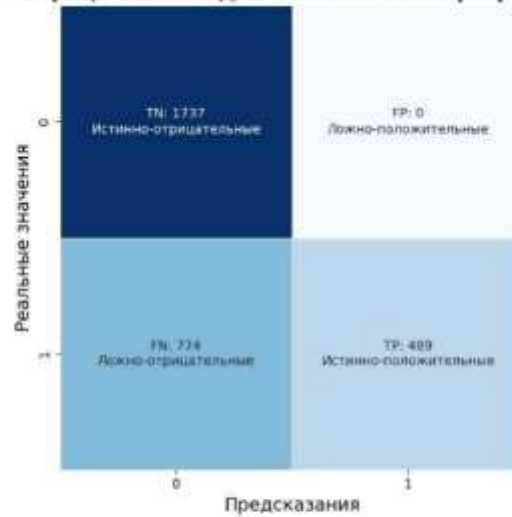
Было проведено сравнение метрик двух прогностических моделей – ММО и МЛР (Таблица 8).



Примечание: ROC-кривая предиктивной модели на основе логистической регрессии (МЛР) (верхний график) имеет $AUC = 0,70$. ROC кривая предиктивной модели на основе машинного обучения (ММО) (нижний график) демонстрирует $AUC = 0,929$.

Рисунок 20 – Результаты ROC-анализа предиктивных моделей до выполнения кросс-валидации

Матрица ошибок для логистической регрессии



Матрица ошибок для машинного обучения

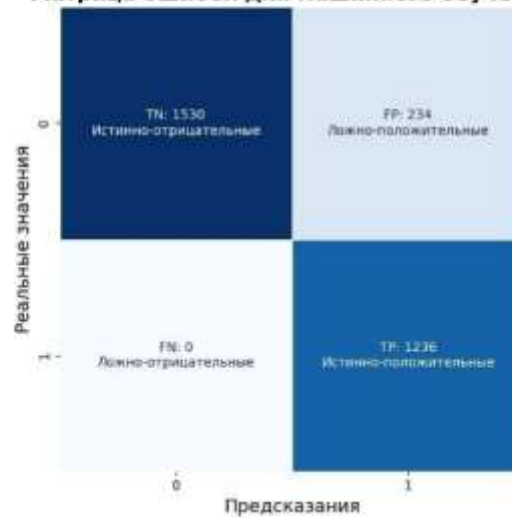


Рисунок 21 – Confusion Matrix после выполнения кросс-валидации Монте-Карло с 1 000 итераций для предиктивной модели на основе логистической регрессии (верхняя матрица) и модели на основе машинного обучения (нижняя матрица)

Таблица 8 – Сравнение предиктивных моделей

Предиктивные модели	Accuracy	Recall	Specificity	Precision	F1-мера	AUC
ММО	0,922	1,000	0,867	0,840	0,913	0,929
МЛР	0,742	0,387	1,000	1,000	0,558	0,700

Примечание: ММО – предиктивная модель на основе машинного обучения; МЛР – предиктивная модель на основе логистической регрессии.

3.3 Независимые ультразвуковые предикторы острой дыхательной недостаточности

При однофакторном логистическом регрессионном анализе было выявлено 25 статистически значимых факторов (см. Таблицу 7), которые включали 22 статистически значимых ультразвуковых показателя, при этом 18 из них (81,8 %) были выявлены в правом легком и только 4 (18,2 %) в левом. Большинство ультразвуковых предикторов 15 (68,2 %) выявлялось после операции (2 оценочный период), локализовались в задневерхних зонах лёгких 7 (31,8 %) и боковых верхних зонах 6 (27,3 %) и относились к интерстициальному синдрому 8 (36,4 %) и по 6 предикторов (27,3 %) – к альвеолярным консолидациям и воздушным бронхограммам.

При проведении ROC-анализа были выявлены 5 наиболее значимых ультразвуковых предиктора, при этом все они относились к заднему отделу правого легкого и выявлялись при выполнении УЗИ лёгких во втором оценочном периоде:

1) задненижняя зона правого легкого: наличие синдрома альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм любого размера. AUC = 0,766, чувствительность 77,1 %, специфичность 76 %, ОШ 3,26 (95 % ДИ: 1,8–6,0);

2) задненижняя зона правого легкого: наличие синдрома альвеолярной консолидации с любым типом воздушных бронхограмм выраженностью более 1 балла. AUC 0,753, чувствительность 77,1 %, специфичность 76 %, ОШ 2,47 (95 % ДИ: 1,5–4,2);

3) задневерхняя зона правого легкого: наличие синдрома альвеолярной консолидации с любым типом воздушных бронхограмм выраженностью более 2 баллов. AUC 0,721, чувствительность 57,1 %, специфичность 84 %, ОШ 2,56 (95 % ДИ: 1,4–4,6);

4) задневерхняя зона правого легкого: интерстициальный синдром выраженностью более 3 баллов. AUC 0,707, чувствительность 80 %, специфичность 52 %, ОШ 2,89 (95 % ДИ: 1,4–6,1);

5) задневерхняя зона правого легкого: наличие синдрома альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм любого размера. AUC 0,691, чувствительность 60 %, специфичность 80 %, ОШ 2,22 (95 % ДИ: 1,3–3,9).

3.4 Регистрация модели как программы для электронной вычислительной машины

Разработанная прогностическая модель была названа «LUCH-D» (Lung Ultrasound in Congenital Heart Disease) и реализована в виде программного продукта: «Прогностическая модель «LUCH-D» на основе ансамблевого алгоритма машинного обучения Random Forest». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ выдано Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент), номер регистрации (свидетельства): 2025661123, дата: 30.04.2025. Что подтверждает её новизну и авторство.

3.5 Обсуждение результатов

Разделение пациентов случайным образом в обучающую, калибровочную и тестовую подвыборки позволило моделям обучаться на одной части и проверять свою эффективность на другой, неизвестной ей части пациентов, это помогло избежать переобучения. При этом важно отметить, что между подвыборками не было статистически значимой разницы, что указывает на то, что модели обучены

и протестированы на данных, которые имеют схожие характеристики. Это может потенциально свидетельствовать о том, что модели будут сопоставимо работать на новых данных, так как они не переобучены на специфических особенностях одной из выборок. Калибровочная подвыборка использовалась для настройки гиперпараметров ММО. Это позволило исследовать, как изменения в параметрах влияют на производительность модели, и выбрать наиболее подходящие настройки, что в свою очередь улучшило точность прогнозов. Нами были подобраны и установлены следующие значения гиперпараметров для ММО, созданной на основе алгоритма Random Forest:

`n_estimators`: 100 – значение гиперпараметра позволило улучшить стабильность и точность модели;

`max_depth`: 30 – значение гиперпараметра помогло контролировать переобучение, позволяя деревьям быть достаточно глубокими для захвата сложных паттернов, но не настолько глубокими, чтобы они начали подстраиваться под шум в данных;

`min_samples_split`: 5 – значение гиперпараметра помогло предотвратить создание узлов, которые могут быть слишком специфичными для обучающего набора данных;

`min_samples_leaf`: 2 – значение гиперпараметра способствовало уменьшению переобучения, обеспечивая, чтобы каждый лист содержит достаточное количество данных;

`bootstrap`: True – использование бутстрэппинга для создания подвыборок данных для обучения каждого дерева помогло улучшить обобщающую способность модели, так как каждое дерево обучалось на случайной подвыборке данных.

Перечисленные настройки гиперпараметров были выбраны с целью оптимизации производительности модели и достижения лучшего баланса между точностью и обобщающей способностью. Как итог, Brier Score 0,095 является показателем хорошей калибровки прогностической модели.

Сравнение моделей ММО и МЛР показывает, что ММО превосходит МЛР

по всем ключевым метрикам, включая AUC, точность, полноту и F1-меру. Модель на основе машинного обучения демонстрирует высокую эффективность в классификации, в то время как логистическая регрессия, несмотря на высокую специфичность и точность предсказаний, показывает недостаточную чувствительность и общую эффективность. При этом ситуация, когда precision равен 1,0, а recall равен 0,387, может объясняться тем, что МЛР делает очень точные предсказания, но пропускает значительное количество истинных положительных случаев из-за высокого порога классификации, приводящего к преобладанию отрицательных предсказаний. Соответственно, МЛР не имеет ложноположительных результатов ($FP = 0$), но имеет большое количество ложноотрицательных ($FN = 774$). Таким образом, модель ММО демонстрирует более сбалансированные и высокие показатели по сравнению с МЛР, что делает её более предпочтительной для задач классификации в данном контексте.

В нескольких работах были предложены прогностические модели для диагностики легочных послеоперационных осложнений в детской кардиохирургии с применением УЗИ лёгких. В исследовании Cantinotti M. и соавт. было создано две предиктивные модели, прогнозирующие успешность экстубации трахеи и продолжительность нахождения пациента в реанимации [91]. В исследование были включены дети всех возрастных групп (от новорожденных до 18 лет), с радикальным и паллиативным характером коррекции ВПС, а УЗИ лёгких выполнялось исключительно в послеоперационном периоде, кроме того оценка состояния лёгких в исследовании проводилась по 36-балльной шкале с учетом только интерстициального синдрома и синдрома альвеолярной консолидации с суммацией полученных баллов, оценка остальных ультразвуковых синдромов не выполнялась. Определение наличия ОДН в послеоперационном периоде не являлось первичной контрольной точкой и не проводилось. Кроме того, не были оценены показатели эффективности разработанных авторами предиктивных моделей. Были также предложены предиктивные модели развития послеоперационных легочных осложнений с учетом выполнения УЗИ лёгких на дооперационном и послеоперационном этапах

[96] и неудачи экстубации трахеи на основе измерения фракции утолщения диафрагмы [113], при этом также не была проведена оценка их эффективности на тестовой подвыборке пациентов, что ставит под сомнение обобщающие возможности созданных моделей.

Были опубликовано несколько предиктивных моделей прогнозирования легочных осложнений в детской кардиохирургии с включением большого числа пациентов, созданных на основе алгоритма машинного обучения, с выполненной оценкой их эффективности на тестовой подвыборке пациентов, однако УЗИ лёгких в этих исследованиях не выполнялось [48, 74]. Так, были предложены предиктивная модель прогнозирования легочных осложнений в детской кардиохирургии, с применением алгоритма машинного обучения на основе учета демографических данных, особенностей операции и данных об интраоперационном артериальном давлении 1 964 пациентов с AUC 0,785 [48], и предиктивная модель для прогнозирования развития пневмонии в детской кардиохирургии с включением 23 000 пациентов с AUC 0,929 [74], однако УЗИ лёгких в данных исследованиях не проводилось и не учитывалось.

Есть данные, что включение уровней BNP [90] и цистатина С [39] в прогностическую модель может дополнительно увеличить ее эффективность, однако это требует дополнительных финансовых затрат и наличие специализированной лаборатории.

Исходя из этого, научная и практическая новизна нашего исследования заключается в том, что нами были созданы две уникальные прогностические модели развития ОДН в послеоперационном периоде у детей грудного возраста после радикальных кардиохирургических операций на основе УЗИ лёгких и клинических данных, в которых учитывались все основные ультразвуковые синдромы, также были изучены показатели эффективности созданных прогностических моделей: accuracy (точность), recall (чувствительность), specificity (специфичность), precision (точность предсказания), F1-меры, AUC, на независимой тестовой подвыборке пациентов.

Прогностическая модель, созданная на основе алгоритма машинного

обучения (ММО), показала более высокую эффективность и была названа «LUCH-D» – Lung Ultrasound in Congenital Heart – Disease.

Было также выявлено 25 статистически значимых независимых предиктора развития ОДН в послеоперационном периоде. При этом 22 независимых предиктора являлись ультразвуковыми параметрами, 2 предиктора были демографическими данными (возраст и масса тела), а один предиктор представлял собой группу интенсивной терапии.

Важно отметить, что большинство выявленных ультразвуковых предикторов было выявлено именно после операции (2 оценочный период), что свидетельствует о вторичном, а не первичном характере лёгочных нарушений у данной категории пациентов. Дооперационная УЗИ-картина отражала исходные повреждения паренхимы лёгких, однако не могла учитывать влияние ИК, ИВЛ, инфузионной нагрузки и хирургической травмы.

Большинство выявленных предикторов (81,8 %) было выявлено в правом лёгком и только 18,2 % в левом. Вероятно, это связано с тем, что, в отличие от левого лёгкого, которое подвергается большему механическому повреждению во время кардиохирургических вмешательств через срединную стернотомию [75], правое лёгкое сохраняет большую целостность и, вероятно, участвует в компенсации сниженной функции левого лёгкого. Следовательно, его повреждения могут более точно отражать выраженность системных патологических процессов (реперфузионный синдром, системный воспалительный ответ), участвующих в дальнейшем повреждении лёгких, и являться наиболее прогностически ценными предикторами развития ОДН.

Также интересно, что все пять наиболее значимых предикторов ($AUC > 0,69$) локализовались в заднем отделе правого лёгкого и также выявлялись в раннем послеоперационном периоде (в течение 2 часов после поступления в ОАРд). Это указывает на ключевую роль задних зон правого лёгкого для прогнозирования развития ОДН.

Наибольшую прогностическую ценность продемонстрировал синдром альвеолярной консолидации (4 из 5 наиболее прогностически ценных

предикторов) с AUC 0,69–0,77 и ОШ 2,22–2,96. Наличие альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм в задне-нижней зоне правого легкого было наиболее прогностически ценным предиктором (AUC 0,766, ОШ 3,26). Это, вероятно, связано с тем, что данный признак, отражает полную деаэрацию соответствующего участка лёгкого (ателектаз) [99], что может свидетельствовать о выраженном повреждении паренхимы и служит ранним маркером последующей клинической манифестации ОДН. Напротив, наличие динамических воздушных бронхограмм в зоне консолидации указывает на сохранение частичной проходимости мелких бронхов [99] и, соответственно, на гиповентиляцию, а не полное ателектазирование. Такой паттерн оказывает меньшее влияние на риск развития клинически значимой ОДН (AUC 0,753, ОШ 2,47).

Наличие интерстициального синдрома с пороговым значением 3 балла в задне-верхней зоне правого легкого имело AUC 0,71 и ОШ 2,89 с чувствительностью 80 %, однако имело низкую специфичность 52 %, что ограничивает данный предиктор для скрининга, поэтому данный предиктор целесообразно использовать в составе многофакторной модели, а не изолированно.

Таким образом, целенаправленный ультразвуковой мониторинг лёгких в первые 2 часа после операции (2 оценочный период) является эффективным инструментом раннего прогнозирования ОДН у детей после кардиохирургических вмешательств. Выявление синдрома альвеолярной консолидации даже небольшой выраженности в заднем отделе правого легкого и отсутствие в альвеолярных консолидациях воздушных бронхограмм может служить основанием для начала целенаправленной персонализированной интенсивной терапии.

3.6 Резюме

Проведенное исследование позволило создать прогностическую модель «LUCN-D» – «Lung Ultrasound in Congenital Heart – Disease», разработанную на основе алгоритма машинного обучения для предсказания развития ОДН в

послеоперационном периоде у детей грудного возраста после радикальных кардиохирургических операций с высокой эффективностью, а также предиктивную модель на основе логистической регрессии. Необходимо отметить, что модели были созданы и протестированы на малой выборке пациентов, что могло повлиять на результаты и требует проведения дальнейших исследований. Учет показателей УЗИ лёгких может улучшать эффективность предиктивных моделей. Оценка выраженности ультразвуковых признаков, согласно представленному нами протоколу, может быть полезна для планирования и проведения исследований, посвященных созданию предиктивных моделей, которые прогнозируют развитие респираторных осложнений в послеоперационном периоде. Однако данное исследование является пилотным и требует валидации на более крупных и разнообразных выборках. Будущие исследования должны включать пациентов из разных медицинских центров и рассматривать возможность модификации предложенной модели для ее упрощения и дальнейшего повышения точности прогнозов.

Было выявлено 22 статистически значимых ультразвуковых показателей, а также 5 наиболее значимых ультразвуковых предиктора развития ОДН с AUC 0,691–0,766. Большинство из них выявлялись после проведения операции (на 2 оценочном периоде) и локализовались в заднем отделе правого легкого.

ГЛАВА 4 ОПИСАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СЕМИОТИКИ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛЁГКИХ У ДЕТЕЙ С ОСТРОЙ ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ

Базовые характеристики принимавших участие в исследовании пациентов ($n = 71$) представлены в Таблице 2. Для пациентов также были характерны следующие показатели ЭХОКГ: иКДОЛЖ на 2 оценочном периоде $30,5 (25,9; 35,48)$ мл/м² и на 4 оценочном периоде $(37,1 \pm 9,96)$ мл/м², ФВЛЖ на 2 оценочном периоде $(55,72 \pm 7,2)$ % и на 4 оценочном периоде $60,0 (55,0; 63,5)$ %.

Острая дыхательная недостаточность была выявлена у 43 пациентов (60,6 %) из общей выборки. В рамках решения задачи был выполнен описательный анализ ультразвуковой семиотики у пациентов с ОДН.

1) Интерстициальный синдром. У пациентов с признаками ОДН наблюдалось значительное увеличение баллов интерстициального синдрома. Суммарный показатель в среднем составлял $(30,86 \pm 5,04)$ балла. Наиболее выражен интерстициальный синдром был в боковых отделах (верхних и нижних зонах) обоих лёгких, передне-верхней и задне-верхней зоне левого легкого, а также в задне-нижних зонах обоих лёгких с ($Me = 3, Max = 4$). В передних отделах, за исключением передне-верхней зоны левого легкого, интерстициальный синдром имел среднюю степень выраженности с ($Me = 2, Max = 4$). Таким образом наиболее выражен интерстициальный синдром у пациентов с ОДН был в боковых и задних отделах обоих лёгких. Левое легкое показывало более высокие значения медианы и моды во многих отделах по сравнению с правым, а передние отделы в обоих лёгких демонстрировали меньшие значения по сравнению с другими отделами.

2) Синдром альвеолярной консолидации. Суммарный показатель в среднем был равен $(17,35 \pm 5,92)$ балла. Наиболее выражен синдром альвеолярной консолидации был в задних отделах обоих лёгких ($Me = 2, Max = 3$), с наибольшей выраженностью в задне-нижней зоне правого легкого ($Me = 3, Max = 4$). Наименее выражены и наименее часто синдром альвеолярной консолидации обнаруживался в передних зонах обоих лёгких ($Me = 0,$

Мах = от 1 до 4). Максимальный балл синдрома альвеолярной консолидации (4) был выявлен в передне-верхней зоне левого легкого. Наименьший максимальный балл (1) был характерен для передне-нижней зоны правого легкого.

3) Локальный В+ синдром. Суммарный показатель имел медиану 2 (1; 3), что указывает на выявление локального В+ синдрома у пациентов с ОДН в среднем в двух зонах лёгких. Максимальное количество таких зон, обнаруживаемых у одного пациента, было 6, минимальное 0. При анализе частоты проявления синдрома зонах лёгких выявлено, что во всех зонах медиана и мода равны 0 при этом во всех зонах лёгких кроме ниже-боковой зоны правого легкого (Мах = 0) локальный синдром хоть один раз, но выявлялся (Мах = 1).

4) Количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации и статическими воздушными бронхограммами. У пациентов с ОДН значения статических воздушных бронхограмм были равны 0 (0; 0,5). Максимальное количество таких зон, обнаруживаемых у одного пациента, было равно 2, минимальное 0.

5) Количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации и динамическими воздушными бронхограммами. У пациентов с ОДН наблюдались высокие медианные значения равные 5 (3; 6). Максимальное количество таких зон, обнаруживаемых у одного пациента, было равно 8, минимальное 0.

6) Количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации, но без воздушных бронхограмм. У пациентов с ОДН сумма зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации без наличия в них воздушных бронхограмм выявлялись часто и имели медиану = 3 (1; 4). Максимальное количество таких зон, обнаруживаемых у одного пациента, было равно 8.

Подробное описание ультразвуковой картины лёгких у пациентов с ОДН представлено в Таблице 9. Визуализация выраженности изменений представлена на Рисунке 22.

Частота выявления гидроторакса, пневмоторакса и нарушения подвижности диафрагмы у пациентов с ОДН (n = 43) с помощью УЗИ лёгких представлены в Таблице 10.

Гидроторакс фиксировался у 23 (53,5 %) пациентов с ОДН. Левосторонний гидроторакс был выявлен у 8 (18,6 %) пациентов: у 7 (16,3 %) малый гидроторакс и у 1 (2,3 %) умеренный. У 35 (81,4 %) пациентов левостороннего гидроторакса не отмечалось. Правосторонний гидроторакс наблюдался у 15 (34,9 %) пациентов: у 11 (25,6 %) пациентов был выявлен малый и у 4 (9,3 %) умеренный гидроторакс. У 28 (65,1 %) пациентов правостороннего гидроторакса выявлено не было.

Пневмоторакс выявлялся у 5 (11,6 %) пациентов. Левосторонний пневмоторакс был зафиксирован у 3 (7,0 %) пациентов и во всех случаях имел малый размер. У 40 (93,0 %) пациентов левостороннего пневмоторакса не наблюдалось. Правосторонний пневмоторакс был выявлен у 2 (4,7 %) пациентов, и в обоих случаях он был малым. У 41 (95,3 %) пациентов правостороннего пневмоторакса не выявлялось.

У всех пациентов с ОДН подвижность левого купола диафрагмы соответствовала норме. Нарушения подвижности правого купола диафрагмы были зафиксированы у 3 (7,0 %) пациентов: у 1 (2,3 %) наблюдался паралич диафрагмы и у 2 (4,7 %) парадоксальное движение. У 40 (93,0 %) пациентов подвижность правого купола диафрагмы была нормальной.

Таблица 9 – Описание ультразвуковой картины лёгких у пациентов с острой дыхательной недостаточностью (n = 43)

Переменная	Значение (баллы)	Минимум (баллы)	Максимум (баллы)
Суммарный показатель выраженности интерстициального синдрома	30,86 ± 5,04	20	43
Суммарный показатель выраженности синдрома альвеолярной консолидации	17,35 ± 5,92	3	30
Суммарный показатель выраженности локального В+ синдрома	2 (1; 3)	0	6
Количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации и статическими воздушными бронхограммами	0 (0; 0,5)	0	2

Продолжение Таблицы 9

Переменная	Значение (баллы)	Минимум (баллы)	Максимум (баллы)
Количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации и динамическими воздушными бронхограммами	5 (3; 6)	0	8
Количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации, но без воздушных бронхограмм	3 (1; 4)	0	8
Левое легкое, передне-верхняя зона, интерстициальный синдром	3 (2; 3)	0	4
Левое легкое, передне-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	0 (0; 1)	0	4
Левое легкое, передне-верхняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Левое легкое, латерально-верхняя зона, интерстициальный синдром	3 (3; 3)	2	4
Левое легкое, латерально-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2 (1; 2)	0	3
Левое легкое, латерально-верхняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Левое легкое, задне-верхняя зона, интерстициальный синдром	3 (2; 3)	0	4
Левое легкое, задне-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2 (2; 3)	0	4
Левое легкое, задне-верхняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Левое легкое, передне-нижняя зона, интерстициальный синдром	2 (2; 3)	2	4
Левое легкое, передне-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	0 (0; 0)	0	3
Левое легкое, передне-нижняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Левое легкое, латерально-нижняя зона, интерстициальный синдром	3 (2; 3)	2	4

Продолжение Таблицы 9

Переменная	Значение (баллы)	Минимум (баллы)	Максимум (баллы)
Левое легкое, латерально-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2 (0,5; 2)	0	3
Левое легкое, латерально-нижняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Левое легкое, задне-нижняя зона, интерстициальный синдром	3 (2; 3)	2	4
Левое легкое, задне-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2 (2; 3)	0	3
Левое легкое, задне-нижняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Правое легкое, передне-верхняя зона, интерстициальный синдром	2 (2; 3)	1	4
Правое легкое, передне-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	0 (0; 0)	0	2
Правое легкое, передне-верхняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Правое легкое, латерально-верхняя зона, интерстициальный синдром	3 (2; 3)	1	4
Правое легкое, латерально-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2 (0; 2)	0	3
Правое легкое, латерально-верхняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 1)	0	1
Правое легкое, задне-верхняя зона, интерстициальный синдром	2 (2; 3)	0	4
Правое легкое, задне-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2 (2; 3)	0	4
Правое легкое, задне-верхняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Правое легкое, передне-нижняя зона, интерстициальный синдром	2 (2; 3)	1	4

Окончание Таблицы 9

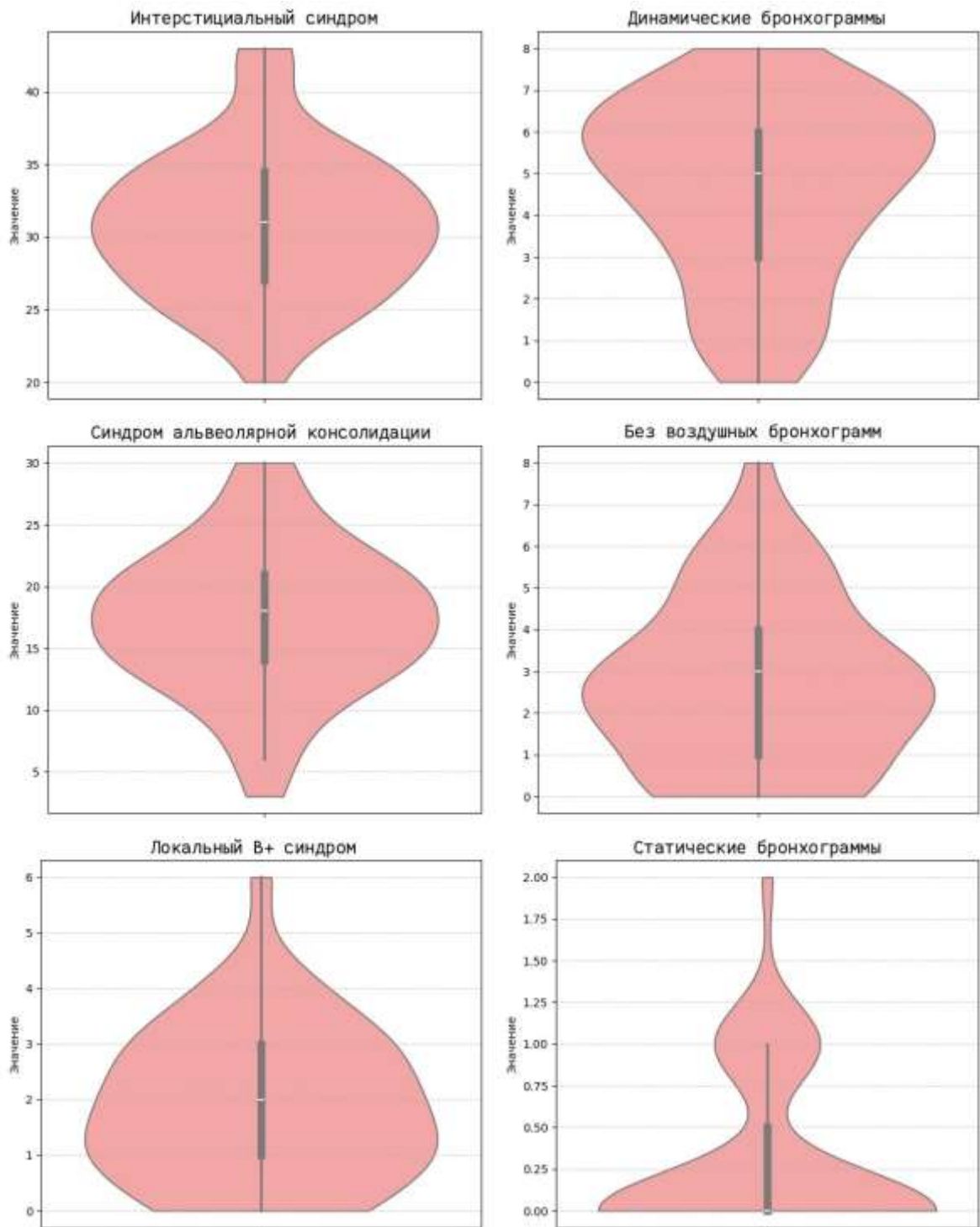
Переменная	Значение (баллы)	Минимум (баллы)	Максимум (баллы)
Правое легкое, передне-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	0 (0; 0)	0	1
Правое легкое, передне-нижняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Правое легкое, латерально-нижняя зона, интерстициальный синдром	3 (2; 3)	0	4
Правое легкое, латерально-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2 (2; 3)	0	4
Правое легкое, латерально-нижняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	0
Правое легкое, задне-нижняя зона, интерстициальный синдром	3 (2; 3)	0	4
Правое легкое, задне-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	3 (2; 3)	0	4
Правое легкое, задне-нижняя зона, локальный В+ синдром	0 (0; 0)	0	1
Примечание: При нормальном распределении данные были представлены средним значением и стандартным отклонением $M \pm SD$; описание количественных данных, не подчиняющихся закону нормального распределения, представляли в виде $Me (Q1; Q3)$, где Me – медианное значение, $Q1$ – первый квартиль (25-й перцентиль), $Q3$ – третий квартиль (75-й перцентиль).			

Таблица 10 – Описание выраженности гидроторакса, пневмоторакса и характера движения диафрагмы у пациентов с острой дыхательной недостаточностью (n = 43)

Переменная	Категория	n (%)
Левосторонний гидроторакс	нет	35 (81,4)
	малый	7 (16,28)
	умеренный	1 (2,33)
Правосторонний гидроторакс	нет	28 (65,12)
	малый	11 (25,58)
	умеренный	4 (9,3)

Продолжение Таблицы 10

Переменная	Категория	n (%)
Левосторонний пневмоторакс	нет	40 (93,02)
	малый	3 (6,98)
Правосторонний пневмоторакс	нет	41 (95,35)
	малый	2 (4,65)
Левый купол диафрагмы	норма	43 (100)
Правый купол диафрагмы	норма	40 (93,02)
	парез (паралич)	1 (2,33)
	парадоксальное движение	2 (4,65)



Примечание: визуализация распределений сумм баллов интерстициального синдрома, синдрома альвеолярной консолидации, локального В+ синдрома, а также количества зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации и динамическими воздушными бронхограммами, количества зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации и статическими воздушными бронхограммами, а также количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации, но без воздушных бронхограмм (сокращено на Рисунке) у пациентов с ОДН.

Рисунок 22 – Визуализация выраженности ультразвуковых синдромов

4.1 Обсуждение результатов

Наши данные подтверждают, что у детей с ОДН в раннем послеоперационном периоде после кардиохирургических вмешательств ультразвуковая картина лёгких характеризуется выраженными интерстициальным синдромом и синдромом альвеолярной консолидации. Высокая частота и выраженность интерстициального синдрома со средним значением суммы баллов в обоих лёгких $30,86 \pm 5,04$, согласуется с литературными данными и объясняется мультимодальной причиной – влиянием ВПС на легочный кровоток, эффектом ИК и интраоперационными повреждениями лёгких [62, 70]. Синдром альвеолярных консолидаций также был выражен у пациентов с ОДН и имел среднее значение ($17,35 \pm 5,92$) балла. По данным источников, синдром альвеолярной консолидации встречается у 41–93 % детей и сохраняется более трёх дней после выполнения кардиохирургической коррекции [46, 61], особенно подвержено консолидированию левое легкое, что ряд авторов связывает с механическим интраоперационным повреждением [75, 88]. Более выраженные изменения выявлялись преимущественно в задних отделах лёгких, что, по литературным данным, является типичным у кардиохирургических пациентов [75, 88]. Однократно был выявлен синдром альвеолярной консолидации в передне-верхней зоне левого легкого с оценкой в 4 балла, что свидетельствует о полной деаэрации сканируемой зоны. Это, вероятно, произошло в результате обтурации сегментарных бронхов верхней доли вязкой мокроты, но в целом передние отделы лёгких практически не затрагивались.

Синдром альвеолярной консолидации был не только значительно выражен, но и имел тенденцию к сочетанию интерстициальным синдромом, что указывает на диффузное поражение легочной ткани и соотносится с тяжестью состояния и нарушением газообмена. Таким образом, наиболее выраженные повреждения легочной паренхимы (интерстициальный синдром и синдром альвеолярной консолидации) у пациентов с ОДН фиксировались в задних отделах лёгких, это согласуется с данными ряда проведенных исследований, в том числе не

связанных с кардиохирургией [24, 61, 70, 75, 76].

Анализ воздушных бронхограмм продемонстрировал, что динамический вариант (признак частичной проходимости бронхов в зоне консолидации) встречались наиболее часто (количество зон 5 (3; 6), тогда как статические бронхограммы (отсутствие проходимости бронхов, но присутствие остаточного (не резорбированного) воздуха в зоне альвеолярной консолидации) оставались редкими (количество зон 0 (0; 0,5) вероятно потому, что остаточный воздух при отсутствии бронхиальной проходимости быстро подвергается резорбции и воздушные бронхограммы исчезают (синдром альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм). Зоны консолидаций без воздушных бронхограмм также были распространены у пациентов с ОДН 3 (1; 4), что патофизиологически обосновано тем, что такие зоны лёгких полностью деаэрированы и не участвуют в газообмене, что находит отражение в литературе [99]. Важно отметить, что выявление синдрома альвеолярной консолидации с динамическими воздушными бронхограммами некоторыми исследователями считается высокоспецифичным признаком пневмонии [56, 65], однако наше исследование дает иные представления о патогенезе данного ультразвукового феномена. Нами было выявлено, что данный вид воздушной бронхограммы чаще свидетельствует о частичной бронхиальной проходимости (гиповентиляции) участка легкого, а не о течении пневмонии, так как он наиболее часто выявлялся среди остальных типов воздушных бронхограмм, его появление в той или иной степени фиксировалось у большинства включенных пациентов без лабораторных и клинических признаков инфекции, а также он легко подвергался рекрутмент-маневру (что не характерно для пневмонии) и имел в динамике тенденцию к переходу в ателектаз (синдром альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм) при отсутствии целенаправленной терапии.

Локальный В+ синдром был слабо выражен, что свидетельствует о том, что локальные интерстициальные изменения паренхимы лёгких не являются ведущим механизмом развития ОДН. Интересно, что среди многих исследователей и экспертов, работающих как со взрослыми пациентами, так и с детьми, существует

мнение, что локальный В+ синдром представляет собой пневмонию вирусной этиологии [100, 112]. Согласно результатам нашего исследования, данный синдром является проявлением неспецифического интерстициального поражения и не является патогномичным признаком пневмонии, что подтверждается литературой [49].

Наиболее часто выявлялся правосторонний гидроторакс (15 пациентов, 34,9 %), что подтверждается литературными данными и, возможно, обусловлено анатомическими особенностями правой плевральной полости [8] или наиболее частым интраоперационным дренированием левой плевральной полости вместе с полостью перикарда в нашем стационаре. Пневмоторакс выявлялся значительно реже и чаще был левосторонним (3 детей, 7,0 %), что, вероятно, связано с механической травмой левого легкого при выполнении операции. Правосторонний пневмоторакс был выявлен у 2 пациентов (4,7 %).

Аномальные типы движения диафрагмы также выявлялись редко (3 пациента, 7,0 %) и все они затрагивали правый купол. Парадоксальное движение диафрагмы выявлялось в нашем исследовании чаще, чем паралич (2 пациента, 4,7 %). Некоторыми авторами считается, что парадоксальное движение диафрагмы является наиболее тяжелой формой ее паралича [29]. Согласно литературе, вероятность спонтанного выздоровления от паралича диафрагмы после кардиохирургических операций у детей происходит примерно в 50 % случаев [22]. Стоит отметить, что пликация диафрагмы в нашем исследовании не выполнялись ни у одного пациента, что позволяет считать возникшие аномальные движения транзиторными. Коллектив авторов [29] считает, что механическое пересечение диафрагмального нерва бывает крайне редко и чаще всего повреждения обратимы (механическая тракция нерва, воздействие холодных растворов, термическое повреждение от электрокоагулятора) и приводят к временной блокаде проведения по диафрагмальному нерву без разрыва аксона. В ранее опубликованном исследовании отмечено, что паралич диафрагмы обнаруживался у 0,3–12,8 % детей после кардиохирургических операций, однако наиболее часто поражался левый купол (53,5 %), при этом в большинстве случаев

(67,4 %) выполнялась пликация диафрагмы, что может свидетельствовать о более серьезных повреждениях диафрагмальных нервов у пациентов, включенных в данное исследование [51]. В одном опубликованном исследовании, проведенном за период с 1996 по 2005 год, из 3 071 пациентов с ВПС, перенесших кардиохирургическую операцию, паралич диафрагмы был диагностирован у 152 детей (4,9 %), у 42 пациентов (27,6 %) потребовалась хирургическая пликация диафрагмы [42].

4.2 Резюме

Для ультразвуковой картины лёгких пациентов исследуемой категории с ОДН наиболее характерно сочетание тяжелого интерстициального синдрома, выраженного синдрома альвеолярных консолидаций без воздушных бронхограмм и с динамическими воздушными бронхограммами. Гидроторакс был зарегистрирован у 53,5 % пациентов с ОДН и чаще был правосторонним. Наиболее подвержены патологическим процессам задние зоны лёгких.

ГЛАВА 5 ВЗАИМОСВЯЗЬ КЛИНИЧЕСКИХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ОСТРОЙ ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ И ИХ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

Базовые характеристики принимавших участие в исследовании пациентов ($n = 71$) представлены в Таблице 2. Для пациентов также были характерны следующие показатели ЭХОКГ: иКДОЛЖ на 2 оценочном периоде $30,5 (25,9; 35,48)$ мл/м² и на 4 оценочном периоде $(37,1 \pm 9,96)$ мл/м², ФВЛЖ на 2 оценочном периоде $(55,72 \pm 7,2)$ % и на 4 оценочном периоде $60,0 (55,0; 63,5)$ %.

5.1 Взаимосвязь клинических и инструментальных данных с острой дыхательной недостаточностью

В результате проведенного корреляционного анализа были выявлены взаимосвязи между ультразвуковыми параметрами, данными других инструментальных методов исследования, а также клинических данных с ОДН. Наиболее сильные корреляционные связи с ОДН были обнаружены у суммы баллов выраженности синдрома альвеолярных консолидаций ($r = 0,66$), суммы баллов выраженности интерстициального синдрома ($r = 0,61$) и количества зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм ($r = 0,51$). Слабые связи с ОДН были обнаружены у возраста пациента ($r = -0,34$) и количества зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации и динамическими воздушными бронхограммами ($r = 0,34$). Остальные переменные имели мощность менее 0,8 и слабые корреляции с ОДН. Результаты point-biserial correlation (взаимосвязи количественных переменных с бинарной) представлены на Рисунке 23.

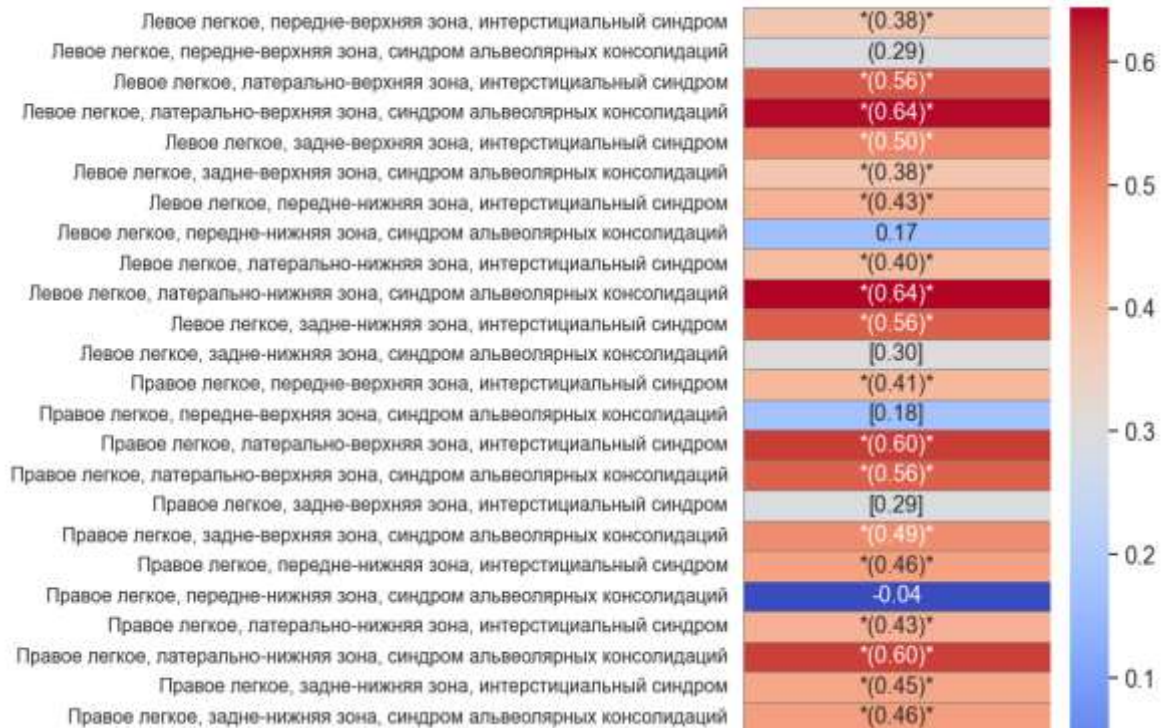


Примечание: результаты point-biserial correlation, тепловая карта. Статистически значимые коэффициенты корреляции выделены рамками: $p < 0,05$ – квадратная рамка – [], $p < 0,01$ – круглая рамка – (), коэффициенты с высокой мощностью ($\geq 0,8$) были дополнительно помечены звездочками – *. Переменные «статические воздушные бронхограммы», «динамические воздушные бронхограммы», «отсутствие воздушных бронхограмм» – подразумевают количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации и данными типами воздушных бронхограмм (сокращено на Рисунке). ФВЛЖ – фракция выброса левого желудочка, иКДОЛЖ – индекс конечно-диастолического объема левого желудочка, СДЛА – систолическое давление в легочной артерии, ИК – искусственное кровообращение. «После операции» – 2 оценочный период, «при переводе» – 4 оценочный период.

Рисунок 23 – Корреляция ультразвуковых показателей, инструментальных и демографических данных лёгких с ОДН

В результате проведенной rank-biserial correlation было выявлено, что наибольшую взаимосвязь с ОДН имеет синдром альвеолярной консолидации, выявленный в латерально-нижней и латерально-верхней зонах левого легкого

($r = 0,64$, $p < 0,01$). Подробные результаты rank-biserial correlation представлены на Рисунке 24.



Примечание: результаты rank-biserial correlation, тепловая карта. Статистически значимые коэффициенты корреляции выделены рамками: $p < 0,05$ – квадратная рамка – [], $p < 0,01$ – круглая рамка – (), коэффициенты с высокой мощностью ($\geq 0,8$) были дополнительно помечены звездочками – *.

Рисунок 24 – Корреляция ультразвуковых синдромов в определенных зонах лёгких с ОДН

5.2 Диагностическая ценность клинических и инструментальных данных

В ходе однофакторного логистического регрессионного анализа выявлено 27 статистически значимых фактора ($p < 0,05$), 25 из них были представлены параметрами УЗИ лёгких. Подробные результаты представлены в Таблице 11.

Для переменных со статистически значимыми коэффициентами, а также со значениями псевдо- $R^2 > 0,2$ был выполнен ROC-анализ с расчетом AUC,

чувствительности и специфичности, а также порог значения переменных для положительной классификации. Всего было выявлено 10 наиболее диагностически ценных переменных Таблице 12. Наибольшую объяснительную способность (псевдо- $R^2 > 0,2$) и диагностическую ценность продемонстрировали следующие параметры:

1) суммарная балльная оценка синдрома альвеолярной консолидации (псевдо- $R^2 = 0,417$; $p < 0,001$) при пороговом значении ≥ 12 баллов ассоциирована с 1,4-кратным увеличением шансов наличия ОДН (ОШ = 1,40; 95 % ДИ: 1,20–1,63), AUC = 0,899, чувствительность 86,05 %, специфичность 82,14 %;

2) суммарная балльная оценка интерстициального синдрома (псевдо- $R^2 = 0,359$; $p < 0,001$) при пороговом значении ≥ 29 баллов также ассоциирована с 1,4-кратным увеличением шансов ОДН (ОШ = 1,40; 95 % ДИ: 1,20–1,68), AUC = 0,870, чувствительность 72,09 %, специфичность 89,29 %;

3) локальные ультразвуковые маркеры с высокой прогностической силой (псевдо- R^2 от 0,215 до 0,315): синдром альвеолярной консолидации в латерально-нижней зоне левого легкого (≥ 1 балл): ОШ = 4,70, AUC = 0,822, синдром альвеолярной консолидации в латерально-верхней зоне левого легкого (≥ 1 балл): ОШ = 4,48, AUC = 0,820, интерстициальный синдром в латерально-верхней зоне правого легкого (≥ 3 балла): ОШ = 6,55, AUC = 0,800, количество зон с синдромом альвеолярной консолидации, но без воздушных бронхограмм (≥ 1 зона): ОШ = 2,31, AUC = 0,806.

Подробные результаты представлены в Таблицах 11 и 12.

Таблица 11 – Результаты однофакторного логистического регрессионного анализа. Статистически значимые факторы. (p -value $< 0,05$)

Параметр	Коэффициент регрессии	P-value	псевдо- R^2 (МакФаддена)
Сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации	0,3387	0,0000	0,4174
Сумма баллов интерстициального синдрома	0,3545	0,0000	0,3594

Продолжение Таблицы 11

Параметр	Коэффициент регрессии	P-value	псевдо-R ² (МакФаддена)
Левое легкое, латерально-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	1,5485	0,0000	0,3151
Левое легкое, латерально-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	1,4997	0,0000	0,2940
Правое легкое, латерально-верхняя зона, интерстициальный синдром	1,8797	0,0001	0,2561
Количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации, но без воздушных бронхограмм.	0,8357	0,0001	0,2451
Левое легкое, латерально-верхняя зона, интерстициальный синдром	1,9234	0,0001	0,2395
Правое легкое, латерально-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	1,0781	0,0000	0,2321
Левое легкое, задне-нижняя зона, интерстициальный синдром	1,6769	0,0001	0,2222
Правое легкое, латерально-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	1,1438	0,0001	0,2155
Правое легкое, задне-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	0,9764	0,0006	0,1626
Правое легкое, передне-нижняя зона, интерстициальный синдром	1,6222	0,0010	0,1573
Левое легкое, передне-нижняя зона, интерстициальный синдром	1,3455	0,0012	0,1442
Правое легкое, задне-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	0,8549	0,0008	0,1437
Левое легкое, латерально-нижняя зона, интерстициальный синдром	1,3876	0,0018	0,1261
Левое легкое, передне-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2,0606	0,0500	0,1192
Правое легкое, передне-верхняя зона, интерстициальный синдром	1,2453	0,0029	0,1174

Окончание Таблицы 11

Параметр	Коэффициент регрессии	P-value	псевдо-R ² (МакФаддена)
Левое легкое, задне-верхняя зона, интерстициальный синдром	1,0978	0,0038	0,1098
Правое легкое, задне-нижняя зона, интерстициальный синдром	1,1429	0,0067	0,0979
Левое легкое, задне-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	0,7515	0,0064	0,0908
Количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации и динамическими воздушными бронхограммами	0,3636	0,0060	0,0893
Возраст	-0,0082	0,0069	0,0887
Правое легкое, латерально-нижняя зона, интерстициальный синдром	0,9170	0,0146	0,0785
Левое легкое, задне-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	0,9356	0,0214	0,0691
Левое легкое, передне-верхняя зона, интерстициальный синдром	0,7376	0,0235	0,0617
Количество зон лёгких с локальным В+ синдромом	-0,3954	0,0288	0,0545
Масса	-0,2934	0,0395	0,0491
Примечание: Для статистически значимых коэффициентов регрессии ультразвуковых и клинических параметров (p-value < 0,05) в Таблице представлены коэффициенты регрессии, уровни значимости (p-value) и значения псевдо-R ² (МакФаддена). Анализ выполнен с использованием теста Вальда.			

Таблица 12 – Характеристики ультразвуковых параметров для выявления ОДН со значениями псевдо- $R^2 > 0,2$

Параметр	Пороговое значение	ОШ (95 % ДИ)	AUC	Se.	Sp.
Сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации	12 баллов	1,40 (1,20; 1,63)	0,8987	86,05 %	82,14 %
Сумма баллов интерстициального синдрома	29 баллов	1,40 (1,20; 1,68)	0,8704	72,09 %	89,29 %
Левое легкое, латерально-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	1 балл	4,70 (2,34; 9,47)	0,8223	74,42 %	74,42 %
Левое легкое, латерально-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	1 балл	4,48 (2,27; 8,84)	0,8198	76,74 %	82,14 %
Количество зон лёгких с альвеолярными консолидациями, но без воздушных бронхограмм	1 зона лёгких	2,31 (1,50; 3,54)	0,8056	81,39 %	71,43 %
Правое легкое, латерально-верхняя зона, интерстициальный синдром	3 балла	6,55 (2,55; 16,86)	0,7998	60,46 %	85,71 %
Правое легкое, латерально-нижняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2 балла	2,94 (1,76; 4,91)	0,7986	81,39 %	71,43 %
Левое легкое, латерально-верхняя зона, интерстициальный синдром	3 балла	6,84 (2,63; 17,83)	0,7823	76,74 %	71,43 %
Левое легкое, задне-нижняя зона, интерстициальный синдром	3 балла	5,35 (2,29; 12,51)	0,7803	65,12 %	78,57 %

Продолжение Таблицы 12

Параметр	Пороговое значение	ОШ (95 % ДИ)	AUC	Se.	Sp.
Правое легкое, латерально-верхняя зона, синдром альвеолярной консолидации	2 балла	3,14 (1,75; 5,61)	0,7790	62,79 %	85,71 %
Примечание: Показаны пороговые значения переменных для положительной классификации, отношения шансов (ОШ), площадь под ROC-кривой (AUC), чувствительность (Se.) и специфичность (Sp.) для параметров с $p < 0,05$ и псевдо- $R^2 > 0,2$.					

5.3 Обсуждение результатов

Наиболее точно объясняют наличие ОДН сумма баллов оценки синдрома альвеолярной консолидации (псевдо- $R^2 = 0,417$, $p < 0,001$), сумма баллов оценки интерстициального синдром (псевдо- $R^2 = 0,359$, $p < 0,001$) и выраженность синдрома альвеолярной консолидации в латерально-нижней зоне левого легкого (псевдо- $R^2 = 0,315$, $p < 0,001$). При этом необходимо отметить, что из 10 наиболее значимых факторов (псевдо- $R^2 > 0,2$ при $p < 0,05$) для объяснения вариабельности ОДН находились в зонах левого легкого – 4 фактора и только 3 в правом легком. При этом 6 факторов относились к латеральным зонам лёгких (4 фактора определяли выраженность альвеолярных консолидаций и 2 интерстициальный синдром). К задним зонам лёгких относился только 1 фактор, определяющий выраженность интерстициального синдрома в задне-нижней зоне левого легкого.

Наибольшую диагностическую точность в выявлении признаков ОДН продемонстрировала сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации (AUC = 0,899), превышение порогового значения в 12 баллов ассоциировано с увеличением шансов наличия ОДН в 1,4 раза. Этот статистически значимый результат подтверждает гипотезу о том, что распространенность альвеолярных изменений в лёгких является ключевым маркером тяжести респираторных нарушений, обусловленных право-левым внутрилегочным шунтированием [75]. Сумма баллов выраженности интерстициального синдрома также показала

высокую дискриминативную способность ($AUC = 0,870$), при этом высокая специфичность (89,29 %) указывает на ее потенциал для исключения ОДН. Интересно, что чувствительность данного параметра была ниже (72,09 %), что указывает на определённые ограничения в выявлении всех случаев ОДН, такой уровень чувствительности может быть связан с наличием альтернативных механизмов развития ОДН, не связанных напрямую с интерстициальным отеком (например, ателектазирование паренхимы легкого из-за нарушения пассажа мокроты и обтурации бронхов). Превышение порога выраженности интерстициального синдрома в 29 баллов было связано с 1,4-кратным ростом шансов наличия ОДН.

Количество зон лёгких с синдромом альвеолярной консолидации, но без наличия воздушных бронхограмм (признак полной деаэрации-ателектаза) имела $AUC = 0,806$ с чувствительностью 81,39 % и специфичностью 71,43 %, что также свидетельствует о хороших дискриминативных возможностях и удовлетворительной диагностической точности. Важно отметить, что при превышении порогового значения всего в 1 зону (из 12 зон в обоих лёгких) увеличивало риск выявления ОДН в 2,31 раза в независимости от размера альвеолярной консолидации в этой зоне, а при корреляционном анализе было показана средняя положительная связь ОДН ($r = 0,51$, $p < 0,01$), что говорит о том, что полное обезвоздушивание даже небольшого участка легкого является неблагоприятным диагностическим признаком и значительно увеличивает шансы наличия признаков ОДН, вероятно за счет того, что в данной зоне полностью отсутствует вентиляция и диффузия газов, при этом вырастает фракция внутрилегочного шунтирования. В то же время количество зон лёгких с альвеолярными консолидациями с динамическими бронхограммами имело низкий псевдо- $R^2 = 0,089$ ($p = 0,006$) и слабую положительную корреляцию с ОДН, что указывает на то, что наличие проходимости некоторых бронхиол в зоне альвеолярной консолидации менее связано с развитием ОДН, вероятно за счет частично сохраненной вентиляции и диффузии и меньшим внутрилегочным шунтированием крови. Это может свидетельствовать о том, что частичная

сохранность вентиляции в зоне альвеолярной консолидации позволяет компенсировать частично утраченную функцию легкого, не приводя к развитию ОДН. Количество зон с альвеолярной консолидацией со статическими бронхограммами было статистически не значимо и имело очень низкую корреляцию с ОДН, вероятно, из-за очень низкой частоты их выявления.

Анализ локализации патологических изменений выявил наибольшую диагностическую значимость наличия повреждения лёгких (синдрома альвеолярной консолидации и интерстициального синдрома) в латеральных отделах лёгких, в которых было выявлено 6 наиболее важных фактора из 7 и только 1 фактор относился к заднему отделу левого легкого. При этом все наиболее значимые факторы были локализованы в левом легком. Ведущую роль играл синдром альвеолярной консолидации в латерально-нижней зоне (AUC 0,822, чувствительность 74,42 %, специфичность 74,42 %) с увеличением шансов выявления ОДН в 4,7 раза при превышении порогового значения всего в 1 балл, а также в латерально-верхней зоне левого легкого (AUC 0,820, чувствительность 76,74 %, специфичность 82,14 %) с увеличением шансов выявления ОДН в 4,48 раза при превышении порогового значения также всего в 1 балл. Анализ выраженности синдрома альвеолярной консолидации в отдельных зонах правого легкого показал, что его наличие в латерально-нижней зоне ассоциировано с увеличением шансов наличия ОДН в 2,94 раза при превышении порогового значения в 2 балла и характеризуется высокой чувствительностью (81,39 %) и удовлетворительной специфичностью (71,43 %). Максимальная корреляция с ОДН наблюдалась также в латеральных отделах обоих лёгких (левое легкое: $r = 0,64$, $p < 0,01$, правое легкое: $r = 0,56-0,60$, $p < 0,01$). Наибольшая диагностическая значимость наличия синдрома альвеолярной консолидации в боковых отделах лёгких при наибольшей его выраженности в задних отделах может объясняться особенностями отношений вентиляция-перфузия (V/Q) у пациентов, находящихся в положении лежа на спине, при котором задние отделы лёгких имеют наилучшую перфузию, но худшую вентиляцию (что обуславливает наименьший вклад этих отделов в

газообменную функцию лёгких за счет внутрилегочного шунтирования и большую подверженность отечным процессам и ателектазированию), в свою очередь передние отделы наоборот имеют наилучшую вентиляцию, но слабую перфузию, что снижает риски их отека и ателектазирования, но и снижает значимость вклада в эффективность дыхания (физиологическое мертвое пространство). Латеральные же отделы имеют оптимальное отношение V/Q , что согласуется с данными литературы [94], поэтому поражение данных участков лёгких, вероятно, наиболее существенно влияет на вентиляционную и диффузионную способность лёгких и чаще приводит к развитию клинически значимой ОДН. Ни один из ультразвуковых признаков, выявленных в передних отделах лёгких, не продемонстрировал достаточной объяснительной способности в отношении ОДН (псевдо- $R^2 < 0,2$), несмотря на статистическую значимость отдельных коэффициентов регрессии ($p < 0,05$). Это согласуется с их меньшей подверженностью патологическим изменениям в положении лежа на спине [94].

Выявление интерстициального синдрома выраженностью > 3 баллов в латерально-верхней зоне правого легкого демонстрирует хорошую дискриминативную способность ($AUC = 0,80$), а также сильную корреляцию ($r = 0,60$, $p < 0,01$) с ОДН. Превышение порогового значения ассоциировано с 6,55-кратным увеличением шансов наличия ОДН с высокой специфичностью 85,71 % и умеренной чувствительностью 60,46 %, что указывает на его ценность как подтверждающего, а не скринингового маркера. Анализ выраженности интерстициального синдрома в зонах левого легкого показал хорошие диагностические возможности латерально-верхней и задне-нижней зон в выявлении ОДН. В латерально-верхней зоне при превышении порога > 3 баллов шансы наличия ОДН возрастали в 6,84 раза с чувствительностью 76,7 % и специфичностью 71,4 % и средней корреляцией с ОДН ($r = 0,56$, $p < 0,01$). В задне-нижней зоне интерстициальный синдром также имел среднюю взаимосвязь с ОДН ($r = 0,56$, $p < 0,01$) и аналогичное превышение порога в 3 балла было связано с 5,35-кратным увеличением шансов развития ОДН ($ОШ = 5,35$; 95 % ДИ: 2,29–12,51), с более высокой специфичностью (78,6 %), но с меньшей

чувствительностью (65,1 %). Таким образом, обе зоны демонстрируют клиническую значимость, однако латерально-верхняя зона может быть более подходящей для скрининга (за счет более высокой чувствительности), а задне-нижняя – для подтверждения диагноза (за счет большей специфичности).

Не было выявлено статистически значимых коэффициентов регрессии у ультразвуковых факторов, локализованных в передних отделах лёгких, вероятно потому, что степень повреждения лёгких в передних отделах в целом была значительно ниже, чем в латеральных и задних, что может быть также объяснено гравитационными влияниями в горизонтальном положении на спине - отношением вентиляция-перфузия (V/Q) [94].

Слабая отрицательная связь с локальным В+ синдромом ($r = -0,27$, $p < 0,05$) достигла уровня статистической значимости, однако её мощность составила менее 0,8, что не позволяет рассматривать данную связь как надёжную. Тем не менее, полученный результат может быть интерпретирован как возможное существование защитного механизма, препятствующего развитию ОДН, что требует дальнейшего изучения. Альтернативное объяснение заключается в технической особенности его оценки: при выраженном интерстициальном синдроме (тяжёлая и крайне тяжёлая степень) локальный В+ синдром теряет дифференциацию и не распознаются как отдельный синдром, что может искусственно снижать частоту его выявления у пациентов с ОДН.

Слабая отрицательная связь ОДН с возрастом и с массой тела ($r = -0,34$ и $-0,26$, $p < 0,01$ соответственно), а также статистически значимые ($p < 0,05$) отрицательные коэффициенты регрессии согласуются с литературными данными [91] и, вероятно, связаны с анатомо-функциональными особенностями строения и развития лёгких, а также слабостью дыхательной мускулатуры у детей более младшего возраста [1].

Остальные факторы имели очень низкие корреляционные связи и коэффициенты корреляции и регрессии были статистически не значимы: ФВЛЖ измеренная на 2 и 4 оценочных периодах, СДЛА измеренное на 4 оценочном периоде, индексированный гидробаланс, иКДО ЛЖ измеренный на 2 и

4 оценочных периодах, длительность пережатия аорты, длительность ИК, длительность операции, что говорит о том, что данные показатели были слабо связаны с повреждением легочной ткани и развитием ОДН. Это может указывать на второстепенную роль гемодинамических факторов в данном контексте и на необходимость учета других модулирующих влияний. В исследовании Cantinotti M. и соавт. было показано, что продолжительность ИК является независимым предиктором продолжительности пребывания в отделении реанимации и интенсивной терапии и продолжительности ИВЛ [91], однако исследований, в которых оценивались взаимосвязи или прогностические возможности показателей ИК на развитие ОДН нами найдено не было.

Полученные данные позволяют предположить двухэтапный характер развития ОДН в раннем послеоперационном периоде у детей после кардиохирургических вмешательств. На первом этапе, наиболее прогностически значимые послеоперационные изменения преимущественно выявлялись в правом лёгком, в частности, в его задних отделах, где были локализованы наиболее значимые ультразвуковые предикторы ОДН, как это было показано нами в разделе 3.3. На втором этапе, по мере прогрессирования патологического процесса, клинически значимая ОДН была ассоциирована с повреждением левого лёгкого, подвергавшегося большему механическому повреждению во время операции через срединную стернотомию. Таким образом, можно выдвинуть гипотезу, согласно которой, повреждение правого лёгкого, выявляемое при выполнении УЗИ лёгких в течение 2 часов после операции (2 оценочный период), служит ранним индикатором и предиктором развития ОДН, тогда как левое лёгкое сильнее отражает стадию клинической манифестации ОДН.

5.4 Резюме

Исследование подтверждает высокую диагностическую ценность ультразвуковых маркеров состояния легочной ткани. Наиболее значимыми в выявлении ОДН оказался синдром альвеолярных консолидаций, особенно

локализованный в латеральных зонах левого легкого. Ключевыми ультразвуковыми критериями, обладающими наибольшей дискриминативной способностью, были суммарный балл выраженности синдрома альвеолярных консолидаций > 12 (AUC = 0,899) и интерстициального синдрома > 29 (AUC = 0,870). Пространственная локализация изменений имеет важное диагностическое значение: наиболее информативными зонами оказались латеральные зоны левого легкого, что в сочетании с данными исследования, описанного в разделе 3.3, может говорить о новых, ранее не изученных, двухэтапных механизмах формирования и развития ОДН. Полученные данные позволяют рекомендовать целенаправленное УЗИ этих зон в рамках комплексной оценки респираторного статуса и может способствовать более точной персонализации интенсивной терапии и оптимизации динамического наблюдения за респираторным статусом у детей с подозрением на ОДН. Требуется дальнейшие исследования.

ГЛАВА 6 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИВНОГО ЛЕЧЕНИЯ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛЁГКИХ С ЦЕЛЮ ПРОФИЛАКТИКИ ОСТРОЙ ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНИРОВАНИЯ ЛЁГКИХ

Базовые характеристики принимавших участие в исследовании пациентов ($n = 71$) представлены в Таблице 2. Для пациентов также были характерны следующие показатели ЭХОКГ: иКДОЛЖ на 2 оценочном периоде $30,5 (25,9; 35,48)$ мл/м² и на 4 оценочном периоде $(37,1 \pm 9,96)$ мл/м², ФВЛЖ на 2 оценочном периоде $(55,72 \pm 7,2)$ % и на 4 оценочном периоде $60,0 (55,0; 63,5)$ %. Результаты сравнения групп по базовым характеристикам на 1 оценочном периоде представлены в Таблице 13.

Оценка эффективности терапии

На исходном уровне (1 оценочный период) группы были сопоставимы по основным демографическим и клиническим характеристикам (возраст, масса тела, тип ВПС, длительность ИК и др.). Группы не различались между собой по большинству базовых характеристик пациентов. Единственным статистически значимым различием являлась более высокая сумма баллов интерстициального синдрома на 1 оценочном периоде в исследуемой группе $32,5 (25,3; 37,0)$ против $26,0 (24,0; 33,0)$; $p = 0,033$, что свидетельствует об изначально более выраженных повреждениях лёгких у этих пациентов. Данное различие носило случайный характер в результате проведенной простой рандомизации, подробно описанной в главе 2.

По окончании первых реанимационных суток (3 оценочный период) в исследуемой группе наблюдалось достоверное улучшение состояния лёгких: индекс PaO_2/FiO_2 в исследуемой группе был статистически значимо выше, чем в контрольной, а сумма баллов интерстициального синдрома и синдрома альвеолярной консолидации статистически значимо ниже. Подробные результаты представлены в Таблице 14.

Наиболее убедительные различия были зафиксированы перед переводом

пациента в профильное отделение (4 оценочный период) после 10-минутного теста дыхания атмосферным кислородом: индекс PaO_2/FiO_2 был статистически значимо выше в исследуемой группе, а сумма баллов интерстициального синдрома и синдрома альвеолярной консолидации статистически значимо ниже. Частота ОДН в исследуемой группе составила 32,4 % (11 из 34), тогда как в контрольной – 86,5 % (32 из 37) ($p < 0,001$). Различие между группами в длительности ИВЛ и количестве реанимационных койко-дней не достигло статистической значимости. Подробные результаты сравнения групп по критериям эффективности терапии на 4 оценочном периоде после 10-минутного теста дыхания атмосферным кислородом представлены в Таблице 15.

Таблица 13 – Сравнение базовых характеристик пациентов между группами до выполнения операции (1 оценочный период)

Переменная	Исследуемая группа (n = 34)	Контрольная группа (n = 37)	p-value
ВПС с гиперволемией МКК (пациенты)	22 (64,7 %)	27 (73,0 %)	0,620
Пол (муж)	15 (44,1 %)	19 (51,4 %)	0,710
Возраст (дни)	99,00 (50,75; 182,75)	114,00 (71,00; 145,00)	0,633
Рост (см)	60,38 ± 7,22	61,11 ± 8,62	0,703
Масса (кг)	5,35 (4,50; 6,36)	5,86 (5,10; 6,90)	0,279
иКДО ЛЖ (мл/м ²)	46,21 ± 15,99	47,51 ± 12,18	0,700
ФВ ЛЖ (%)	67,00 (67,00; 69,00)	67,00 (65,00; 67,00)	0,125
Индекс PaO_2/FiO_2	365,50 ± 95,89	392,17 ± 89,81	0,230
Сумма баллов выраженности интерстициального синдрома в обоих лёгких при поступлении в стационар	32,50 (25,25; 37,00)	26,00 (24,00; 33,00)	0,033
Сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации в обоих лёгких при поступлении в стационар	7,50 (0,00; 10,50)	6,00 (0,00; 11,00)	0,837

Продолжение Таблицы 13

Переменная	Исследуемая группа (n = 34)	Контрольная группа (n = 37)	p-value
Продолжительность ИК (мин)	55,00 (39,25; 80,00)	50,00 (44,00; 67,00)	0,881
Продолжительности окклюзии аорты (мин)	27,50 (22,25; 41,75)	30,00 (25,00; 38,00)	0,519
Интраоперационный гидробаланс (мл/кг)	25,2 (14,37; 34,19)	30,00 (19,45; 40,57)	0,277
Примечание: ВПС с гиперволемией МКК – пациенты с врожденными пороками сердца, сопровождающимися гиперволемией малого круга кровообращения. иКДО ЛЖ – индекс конечно-диастолического объема левого желудочка по данным ЭХОКГ при поступлении пациента в стационар, ФВ ЛЖ – фракция выброса левого желудочка по данным ЭХОКГ при поступлении пациента в стационар. ИК – искусственное кровообращение.			

Таблица 14 – Результаты сравнение групп по окончании первых реанимационных суток (3 оценочный период)

Критерии эффективности	Исследуемая группа (n = 34)	Контрольная группа (n = 37)	p-value
Индекс PaO ₂ /FiO ₂	311,50 (286,25; 346,00)	242,90 (214,30; 286,00)	< 0,001
Сумма баллов выраженности интерстициального синдрома в обоих лёгких	25,91 ± 6,72	29,76 ± 5,30	0,009
Сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации в обоих лёгких	9,32 ± 5,57	16,11 ± 5,51	< 0,001

Таблица 15 – Результаты сравнения групп перед переводом в профильное отделение из отделения реанимации после 10-минутного теста дыхания атмосферным кислородом (4 оценочный период)

Критерии эффективности	Исследуемая группа (n = 34)	Контрольная группа (n = 37)	p-value
Наличие ОДН (пациенты)	11 (32,4 %)	32 (86,5 %)	< 0,001
Индекс PaO ₂ /FiO ₂	316,67 ± 38,99	239,22 ± 50,86	< 0,001
Сумма баллов выраженности интерстициального синдрома в обоих лёгких	25,18 ± 5,49	30,38 ± 5,51	< 0,001
Сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации в обоих лёгких	9,44 ± 5,46	17,51 ± 6,05	< 0,001
Длительность ИВЛ (часы)	7,25 (5,13; 9,38)	8,50 (6,50; 12,00)	0,067
Реанимационный койко-день	1,000 (1,000; 1,000)	1,000 (1,000; 4,000)	0,073
Примечание: ИВЛ – искусственная вентиляция лёгких.			

Оценка безопасности терапии

Была проведена оценка послеоперационных осложнений и различий между группами. Все выявленные послеоперационные осложнения были классифицированы на 4 группы: нарушения ритма сердца, клиническая смерть с успешной сердечно-легочной реанимацией (СЛР), неврологические осложнения и постинтубационный отек гортани. Статистически значимых различий в частоте выявления послеоперационных осложнений между группами не было ($p = 1,0$). НРС в исследуемой группе регистрировались у 2 пациентов (5,9 %), в группе контроля у 3 пациентов (8,1 %). СЛР проводилась 3 пациентам из группы контроля (8,1 %), в исследуемой группе такого осложнения не было. Неврологические осложнения фиксировались у 1 пациента из исследуемой группы (2,9 %) и у 3 пациентов из контрольной группы (8,1 %). Постинтубационный отек гортани развился у 3 пациентов, все они относились к исследуемой группе (8,1 %). Все выявленные различия были статистически незначимы ($p > 0,05$). Уровень креатинина был статистически значимо выше в

группе исследования ($p = 0,005$), при этом в обеих группах медианное значение находилось в пределах референсных значений. Различия в уровне мочевины не достигли статистической значимости. Подробные результаты представлены в Таблице 16.

Стоит отметить, что в ходе проведения исследования был 1 летальный случай в контрольной группе (сепсис, синдром полиорганной недостаточности), согласно критериям исключения, пациент был исключен из исследования.

Таблица 16 – Структура послеоперационных осложнений в группах

Переменная	Исследуемая группа (n = 34)	Контрольная группа (n = 37)	p-value
Все послеоперационные осложнения (пациенты)	6 (17,6 %)	6 (16,2 %)	1,0000
Неврологические осложнения (пациенты)	1 (2,9 %)	3 (8,1 %)	0,6155
Клиническая смерть с успешной сердечно-легочной реанимацией (пациенты)	0 (0,0 %)	3 (8,1 %)	0,2406
Нарушения ритма сердца (пациенты)	2 (5,9 %)	3 (8,1 %)	1,0000
Постинтубационный отек гортани (пациенты)	3 (8,8 %)	0 (0,0 %)	0,1047
Уровень креатинина (мкмоль/л) перед переводом из реанимации	55,500 (50,000; 59,000)	50,000 (46,000; 55,000)	0,0049
Уровень мочевины (ммоль/л) перед переводом из реанимации	5,650 (4,425; 7,125)	5,100 (3,600; 6,600)	0,2311

6.1 Обсуждение результатов

Стратегия интенсивной терапии, основанная на мониторинге с помощью УЗИ лёгких, продемонстрировала превосходство над традиционным подходом. Это подтверждается улучшением ключевых показателей состояния пациентов и функции лёгких. Одним из важных преимуществ стратегии интенсивной терапии,

основанной на УЗИ-мониторинге, является снижение количества пациентов с ОДН. Частота развития ОДН была достоверно ниже в исследуемой группе (32,4 % против 86,5 %, $p < 0,001$), что является ключевым показателем успешности профилактики и лечения. Кроме того, в исследуемой группе отмечено достоверное снижение суммарной выраженности ультразвуковых признаков поражения лёгочной паренхимы: балльной оценки интерстициального синдрома как на 3 оценочном периоде ($p = 0,009$), так и на 4 оценочном периоде ($p < 0,001$), а также синдрома альвеолярных консолидаций по сравнению с контрольной группой как 3, так и на 4 оценочных периодах ($p < 0,001$), что отражает снижение отека интерстиция и ателектазирования паренхимы. Особенно показателен факт, что начальная выраженность интерстициального синдрома на 1 оценочном периоде у детей, рандомизированно распределенных в исследуемую группу, была статистически значимо выше, чем в контрольной (сумма баллов выраженности интерстициального синдрома 32,5 баллов против 26,0 в контрольной, $p = 0,033$). Эффективность проводимой интенсивной терапии под УЗИ контролем состояния лёгких подтверждается литературными данными, в частности эффективность лечения интерстициального синдрома с помощью диуретической терапии фуросемидом [77] и эффективность лечения синдрома альвеолярной консолидации с помощью рекрутмент-маневра под контролем УЗИ [63, 124]. Liu и соавт., предлагали комплексную схему лечения тяжёлых лёгочных заболеваний у новорождённых под контролем УЗИ лёгких у постели больного. Эта схема включала несколько ключевых компонентов: УЗИ-контролируемый бронхоальвеолярный лаваж с введением 1,5–3,0 мл физиологического раствора в эндотрахеальную трубку с последующей вентиляцией в течение 20–30 минут при повышенных параметрах ИВЛ с последующей аспирацией секрета, УЗИ-контролируемый торакоцентез при массивном плевральном выпоте и пневмотораксе, а также алгоритм принятия решения о начале и окончании ИВЛ на основе УЗИ лёгких [107]. Однако выводы исследования носят предварительный характер, так как его дизайн ограничен описательной серией клинических случаев без контрольной группы и рандомизации, что ограничивает

возможность оценки истинной эффективности предложенного подхода и требует подтверждения в последующих рандомизированных контролируемых исследованиях.

Важным критерием оценки функции лёгких также является индекс $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$, который показывает, насколько эффективно легкие поглощают кислород из воздуха. В исследуемой группе индекс $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ статистически значимо выше, чем в контрольной, как на 3 оценочном периоде, так и на 4 оценочном периоде ($p < 0,001$). Это говорит о том, что предложенный способ профилактики и лечения улучшает газообмен в лёгких. Полученный результат согласуется с литературными данными, в которых было показано позитивное влияние рекрутмент-маневра под контролем УЗИ лёгких на величину индекса $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ [124]. Значительное увеличение индекса $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ относительно контрольной группы, вероятнее всего, связано с тем, что в исследуемой группе статистически значимо снижалась выраженность синдрома альвеолярной консолидации, что приводило к снижению внутрилегочного шунтирования справа-налево, а также снижалась выраженность интерстициального синдрома, что приводило к улучшению диффузионной способности альвеолярно-капиллярной мембраны.

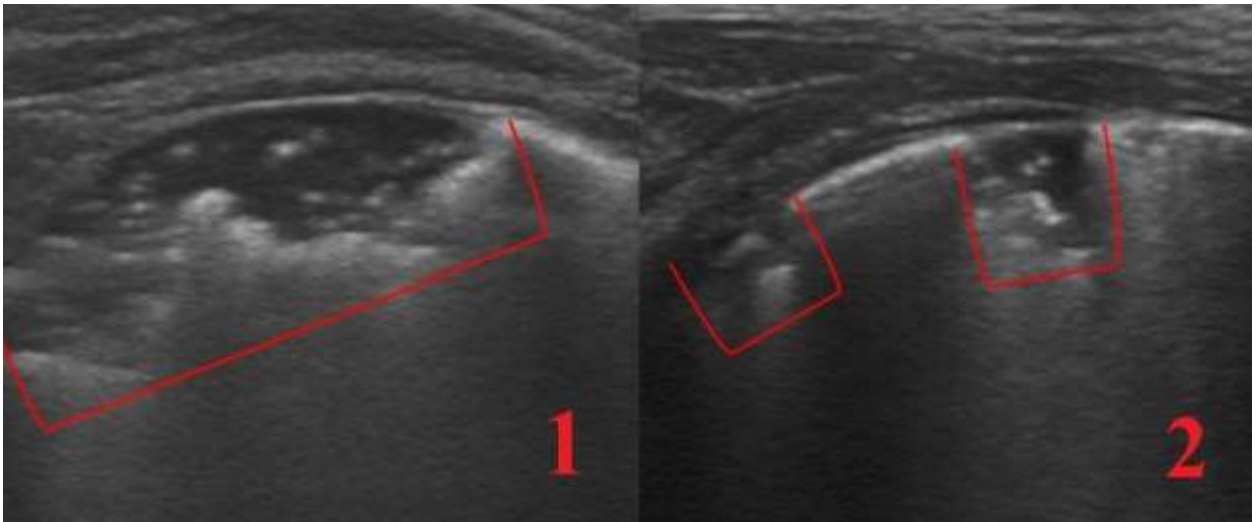
В исследуемой группе наблюдалось снижение продолжительности ИВЛ по сравнению с контрольной группой, однако достигнутые различия не достигли статистической значимости ($p = 0,067$). Было также отмечено уменьшение реанимационного койко-дня в исследуемой группе, однако различия также не достигли статистической значимости ($p = 0,073$). Это, вероятно, связано с особенностями организации стационара и ОАРд, где перевод пациентов в профильное отделение с компенсированной ОДН возможен при сохранении артериальной сатурации $> 92\%$ на низкопоточном кислороде (до 1,5 л/мин). В данном случае организационно пациент переводился из ОАРд в профильное кардиохирургическое отделение, но суточное наблюдение осуществлялось дежурным реаниматологом на базе профильного отделения. Подробный алгоритм принятия решения о переводе пациента в профильное отделение описан в

разделе 2.1.2. Также следует отметить, что различия по дополнительным вторичным критериям (по длительности ИВЛ и продолжительности пребывания в ОАРд) могли не достичь статистической значимости из-за недостаточной мощности исследования для выявления статистически значимых различий по этим показателям, поскольку расчёт объёма выборки не проводился с учётом ожидаемых для них размеров эффектов, как это описано в разделе 2.8.1.

Анализ безопасности предложенного алгоритма интенсивной терапии показал, что не было выявлено статистически значимых различий между исследуемой группой и контрольной в количестве и частоте зафиксированных осложнений (неврологических осложнений, нарушений ритма сердца, постинтубационного отека гортани, клинической смерти с успешной сердечно-легочной реанимацией). Повышение уровня креатинина в исследуемой группе, вероятно, обусловлено более активным назначением фуросемида, что может сопровождаться нефротоксическим эффектом, однако сохранение значений в пределах нормы и отсутствие различий по уровню мочевины позволяют считать это изменение транзиторным и клинически незначимым. Проведённый анализ не выявил статистически значимого увеличения частоты серьёзных послеоперационных осложнений в исследуемой группе, что свидетельствует о безопасности предложенного алгоритма интенсивной терапии

Клинический пример 1. Ребенок возрастом 1 месяц, массой тела 4,5 кг, ростом 58 см. Диагноз: ВПС. Дефект межжелудочковой перегородки. Открытое овальное окно. Была выполнена радикальная коррекция ВПС. При выполнении УЗИ лёгких в послеоперационном периоде (2 оценочный период) выявлен интерстициальный синдром тяжелой степени в обоих лёгких (сумма баллов выраженности интерстициального синдрома 26), сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации = 19. Пневмоторакса, плеврального выпота выявлено не было. Был выполнен анализ крови с целью определения уровня общего белка, уровень был нормальным. Начата диуретическая терапия методом дробного введения фуросемида с положительным ответом, рестриктивная инфузионная терапия. В связи с выраженным синдромом альвеолярной консолидации был

выполнен рекрутмент-маневр с положительным эффектом (легкие признаны рекрутабельными), ПДКВ установлен на уровень 7. В связи с более выраженными проявлениями синдрома альвеолярной консолидации в боковых и задних отделах обоих лёгких, выполнялось позиционирование пациента попеременно на правом и левом боку с вибрационным массажем грудной клетки с упором на выявленные проблемные отделы. Проводилась санация трахеобронхиального дерева. Рекрутмент-маневр осуществлялся при каждом отсоединении дыхательного контура. При выполнении УЗИ лёгких через 2 часа было выявлено снижение суммы баллов выраженности интерстициального синдрома до 20 (интерстициальный синдром средней степени в обоих лёгких), суммарный балл синдрома альвеолярной консолидации снизился до 2, уровень ПДКВ был снижен до 6. После экстубации трахеи и перевода на самостоятельное дыхание произошло повторное увеличение суммы баллов синдрома альвеолярной консолидации до 6 в задних отделах обоих лёгких, терапия была продолжена с учетом выявленных проблемных зон: позиционирование пациента, вибрационный массаж, санация верхних дыхательных путей с целью стимуляции кашлевого рефлекса. Перевод пациента был осуществлен на конец первых реанимационных суток. При проведении УЗИ лёгких перед переводом был выявлен интерстициальный синдром тяжелой степени в левом легком и средней степени в правом легком с суммой баллов выраженности интерстициального синдрома 22. Сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации = 8, со значительным снижением относительно 2 оценочного периода (19 баллов) (Рисунок 25). Пневмоторакса, плеврального выпота выявлено не было. Индекс PaO_2/FiO_2 был равен 347 после 10-минутного теста самостоятельного дыхания атмосферным кислородом. Общий гидробаланс перед переводом (-75,3 мл/кг). Признаков ОДН не было. Продолжительность ИВЛ составила 7 часов. Длительность нахождения пациента в ОАРд составила 1 реанимационный койко-день. Послеоперационных осложнений не было. Уровень креатинина 61 мкмоль/л, уровень мочевины 7,5 ммоль/л.



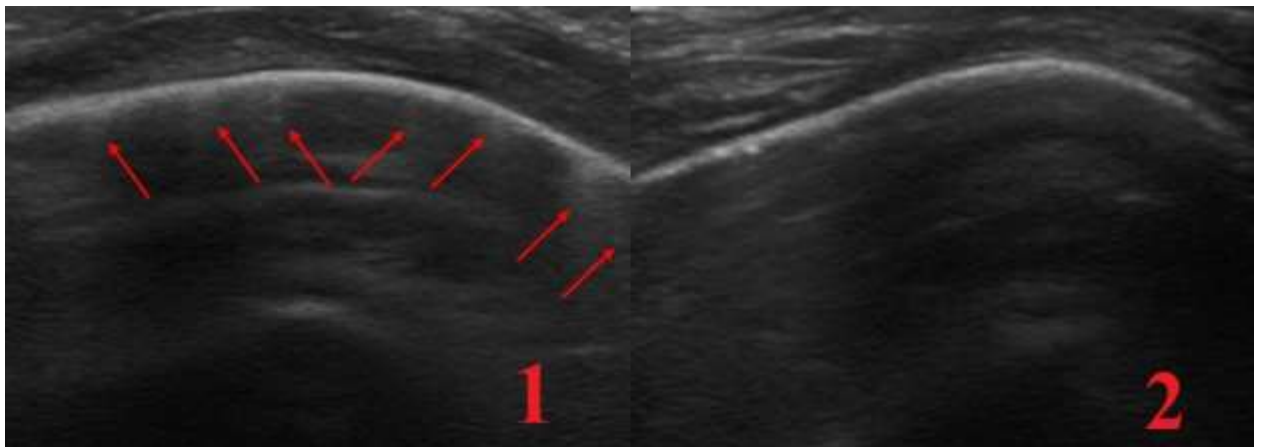
Примечание: под номером 1 – сканограмма задне-нижней зоны правого легкого на 2 оценочном периоде, под номером 2 – сканограмма той же зоны на 4 оценочном периоде. Красными скобками выделены размеры альвеолярных консолидаций.

Рисунок 25 – Уменьшение выраженности синдрома альвеолярной консолидации в результате проведенного лечения (клинический пример 1)

Клинический пример 2. Ребенок возрастом 3 месяца, массой 6,9 кг, ростом 62 см. Диагноз: ВПС. Клапанный стеноз легочной артерии. Была выполнена радикальная коррекция ВПС. При выполнении УЗИ лёгких в послеоперационном периоде (2 оценочный период) выявлен интерстициальный синдром тяжелой степени в обоих лёгких, сумма баллов выраженности интерстициально синдрома 31, сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации 14, пневмоторакса, плеврального выпота выявлено не было. Был выполнен анализ крови с целью определения уровня общего белка, выявлена гипопротейнемия. Начата инфузия альбумина, диуретическая терапия посредством дробного введения фуросемида с контролем в динамике с положительным ответом, рестриктивная инфузионная терапия. В связи с выраженными альвеолярными консолидациями был выполнен рекрутмент-маневр с положительным эффектом (легкие признаны рекрутабельными), ПДКВ установлен на уровень 7. В связи с более выраженным проявлениями синдрома альвеолярных консолидаций в правом легком (боковой и задний отдел), выполнялось позиционирование пациента преимущественно на

левом боку с вибрационным массажем с упором на выявленные проблемные отделы. Проводилась санация трахеобронхиального дерева. Рекрутмент-маневр осуществлялся при каждом отсоединении дыхательного контура. При выполнении УЗИ лёгких через 2 часа после начала терапии было выявлено снижение суммы баллов интерстициального синдрома до 28 (интерстициальный синдром тяжелой степени в обоих лёгких). Суммарный балл синдрома альвеолярной консолидации снизился до 6. Терапия была продолжена, уровень ПДКВ был снижен до 6. ИВЛ продолжена в связи с нарушениями ритма сердца. К концу первых реанимационных суток (3 оценочный период) был выявлен интерстициальный синдром средней степени в обоих лёгких, сумма баллов выраженности интерстициального синдрома 18, сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации 12, наиболее выраженные зоны были в задних отделах обоих лёгких, преимущественно в правом. Пневмоторакса и плеврального выпота выявлено не было. Индекс $PaO_2/FiO_2 = 417$. Уровень общего белка был скорректирован, инфузия альбумина окончена, остальная терапия была продолжена с учетом выявленных патологических процессов. Уровень ПДКВ увеличен до 7. УЗИ контроль и коррекция терапии выполнялась ежедневно, ограничений по количеству и частоте исследований не было. На 4 сутки после поступления в палату интенсивной терапии ребенок был экстубирован и переведен на самостоятельное дыхание. При выполнении УЗИ лёгких было зафиксирован интерстициальный синдром средней степени в левом легком и легкой степени в правом, суммарный балл интерстициального синдрома 17, суммарный балл синдрома альвеолярной консолидации 8. Альвеолярные консолидации локализовались равномерно в задних зонах обоих лёгких (по 2 балла выраженности в каждом). В связи с этим, выполнялось преимущественно боковое позиционирование пациента попеременно на правом и левом боку, вибрационный массаж грудной клетки с упором на выявленные зоны, санация верхних дыхательных путей со стимуляцией кашля. Перевод пациента в профильное отделение был осуществлен на конец четвертых реанимационных суток. При проведении УЗИ лёгких (4 оценочный период) был выявлен

интерстициальный синдром средней степени (сумма баллов выраженности интерстициального синдрома 22), со значительным снижением относительно 2 оценочного периода (31 балл) (Рисунок 26). Сумма баллов синдрома альвеолярной консолидации была равна 9. Пневмоторакса, плеврального выпота выявлено не было. Индекс PaO_2/FiO_2 был равен 366 после 10-минутного теста самостоятельного дыхания атмосферным кислородом. Общий гидробаланс перед переводом (-9,56 мл/кг). Признаков ОДН не было. Продолжительность ИВЛ составила 70 часов. Длительность нахождения пациента в ОАРд составила 4 реанимационных койко-дня. Было зафиксировано послеоперационное осложнение (нарушение ритма сердца). Уровень креатинина на 4 оценочном периоде был 59 мкмоль/л, уровень мочевины 16,3 ммоль/л.



Примечания: под номером 1 – сканограмма передне-верхней зоны правого легкого на 2 оценочном периоде, под номером 2 – сканограмма той же зоны на 4 оценочном периоде. Красными стрелками обозначены В-линии (тонкие гиперэхогенные вертикальные лучи), местами сливающиеся воедино.

Рисунок 26 – Уменьшение выраженности интерстициального синдрома в результате проведенного лечения (клинический пример 2)

6.2 Резюме

Таким образом, предложенная стратегия интенсивной терапии под контролем УЗИ лёгких показала высокую эффективность и безопасность. Ее использование позволяет снизить количество пациентов с ОДН, уменьшить выраженность патологических изменений в лёгких и улучшить их функцию, что выражается в повышении индекса PaO_2/FiO_2 . Полученные данные подтверждают целесообразность внедрения данного подхода в практику ведения детей грудного возраста после кардиохирургических вмешательств. Требуются многоцентровые исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная детская кардиохирургия достигла выдающихся успехов в области коррекции ВПС, включая наиболее сложные формы, ранее считавшиеся несовместимыми с жизнью. Тем не менее, несмотря на техническое совершенствование оперативных вмешательств и аппаратуры ИК, проблема послеоперационных осложнений, особенно со стороны респираторной системы, остаётся одной из ключевых в определении исходов госпитального периода. Среди них ОДН занимает ведущее место как по частоте встречаемости, так и по тяжести последствий: она не только увеличивает продолжительность пребывания в отделении анестезиологии-реанимации, но и существенно повышает риск инфекционных осложнений, формирования фиброзных изменений в лёгочной ткани, а в ряде случаев – и летального исхода. В связи с этим поиск надёжных, ранних и прогностически значимых маркеров развития ОДН у детей грудного возраста после радикальных кардиохирургических операций приобретает не только научную, но и практическую актуальность. В данный момент общепринятым инструментальным методом исследования в палатах интенсивной терапии, позволяющим визуализировать ткань легкого, является рентгенография грудной клетки в прямой проекции. Хорошо известны ее недостатки: наличие ионизирующего излучения, в том числе ограничивающее многократный контроль в динамике; суммационный характер полученного изображения, зачастую не позволяющий точно дифференцировать патологические процессы в лёгких и плевральной полости; длительность исследования. В последние годы УЗИ лёгких всё шире применяется в отделениях интенсивной терапии как быстрый, безопасный и высокоинформативный инструмент для оценки состояния респираторной системы. Тем не менее, несмотря на рост числа публикаций, посвящённых использованию УЗИ у детей после кардиохирургических операций, ряд фундаментальных проблем остаётся нерешённым: отсутствует стандартизированный протокол, охватывающий все ключевые ультразвуковые синдромы; не определена типичная ультразвуковая картина лёгких у детей с ОДН

в раннем послеоперационном периоде; не созданы и не валидированы прогностические модели, которые бы объединяли ультразвуковые, клинические, демографические и инструментальные данные для ранней идентификации пациентов с высоким риском развития ОДН; недостаточно изучена информативность и диагностическая значимость отдельных ультразвуковых параметров и их связь с наличием ОДН; отсутствуют рандомизированные контролируемые исследования, подтверждающие эффективность персонализированной интенсивной терапии, корректируемой в реальном времени на основании динамического ультразвукового мониторинга.

Целью данного исследования являлось повысить качество и результативность интенсивной терапии у детей после радикальных кардиохирургических операций на основе диагностики и интенсивной терапии патологических процессов в лёгких для профилактики развития острой дыхательной недостаточности с использованием ультразвукового сканирования.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение определенных задач:

- 1) создать прогностическую модель и выявить независимые предикторы развития острой дыхательной недостаточности в послеоперационном периоде у детей после радикальных кардиохирургических операций на основе УЗИ лёгких;
- 2) описать ультразвуковую семиотику патологических изменений в лёгких у детей с острой дыхательной недостаточностью после радикальных кардиохирургических операций в условиях отделения анестезиологии-реанимации;
- 3) выявить взаимосвязи клинических и инструментальных данных с острой дыхательной недостаточностью и оценить их диагностическую ценность;
- 4) оценить эффективность интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики острой дыхательной недостаточности на основе ультразвукового исследования лёгких у детей после радикальных кардиохирургических операций.

Настоящее исследование представляет собой комплексное, многоэтапное

клиническое исследование, проведенное на базе ОАРд Федерального центра сердечно-сосудистой хирургии г. Красноярск в период с октября 2023 года по март 2025 года. В диссертационное исследование было включено 72 пациента, отобранных методом сплошного охвата при соответствии критериям включения в период с октября 2023 по март 2025 года, 1 пациент был исключен в связи с летальным исходом на пилотном этапе исследования. Таким образом, общая выборка составила 71 пациента, подходившего под критерии включения и не имевшего критериев исключения. Исследование состояло из двух последовательных этапов: пилотного (60 пациентов) и заключительного (71 пациент).

Для достижения перечисленных задач был разработан и внедрён оригинальный 12-зонный протокол УЗИ лёгких, обеспечивающий количественную и изолированную оценку шести ключевых ультразвуковых синдромов: интерстициального синдрома, синдрома альвеолярной консолидации (с детализацией по размеру и типам воздушных бронхограмм), локального В+ синдрома, гидроторакса, пневмоторакса и характера движения диафрагмы.

Во-первых, на основе этого протокола и данных, собранных у 60 пациентов на пилотном этапе, была создана и подвергнута внутренней валидации прогностическая модель «LUCH-D» (Lung Ultrasound in Congenital Heart Disease – «УЗИ лёгких при врождённых пороках сердца») на базе ансамблевого алгоритма машинного обучения Random Forest. Важно подчеркнуть, что методология разработки модели была специально адаптирована под условия ограниченной выборки: данные были случайным образом разделены на три независимые подвыборки (обучающую – 70 %, калибровочную – 10 % и тестовую – 20 %), при этом между подвыборками не было статистически значимых различий по всем базовым характеристикам пациентов, что это позволило избежать переобучения и обеспечить объективную оценку эффективности прогностической модели. Модель «LUCH-D» продемонстрировала высокие прогностические характеристики: $AUC = 0,929$, чувствительность – 100 %, специфичность – 86,7 %. Это значительно превосходит показатели традиционной модели

логистической регрессии, построенной на тех же данных ($AUC = 0,700$, чувствительность = 38,7 %, специфичность = 100 %), что свидетельствует о высокой эффективности современных методов машинного обучения для решения задач медицинского прогнозирования в условиях сложных, нелинейных зависимостей. Созданная модель была зарегистрирована как программа для ЭВМ, что юридически закрепляет её авторство и новизну. Более того, проведённый однофакторный логистический регрессионный анализ позволил выявить 25 независимых предикторов развития ОДН, из которых 22 были ультразвуковыми параметрами. Наиболее ценными для прогноза оказались признаки, выявляемые в течение первых 2 часов после поступления пациента в ОАР (2 оценочный период) и локализованные в заднем отделе правого лёгкого. Эти данные имеют фундаментальное значение: они указывают на возможность раннего (в первые часы после операции) выявления пациентов группы высокого риска, что создаёт «терапевтическое окно» для начала персонализированной терапии. Интересно, что большинство предикторов локализованы в правом, а не в левом лёгком. Это позволяет выдвинуть гипотезу, согласно которой правое лёгкое, будучи менее подверженным механической травматизации при выполнении вмешательств через срединную стернотомию, служит более чувствительным «индикатором» системных патологических процессов (реперфузионного синдрома, системного воспалительного ответа), в то время как левое лёгкое в большей степени отражает локальные механические повреждения.

Во-вторых, на заключительном этапе исследования нами была описана типовая ультразвуковая семиотика лёгких у детей с ОДН после кардиохирургических вмешательств. Анализ данных 43 пациентов с подтверждённой ОДН показал, что для данной категории характерно сочетание тяжёлого интерстициального синдрома (суммарный балл $30,86 \pm 5,04$) и выраженного синдрома альвеолярной консолидации (суммарный балл $17,35 \pm 5,92$). При этом наиболее подвержены патологическим процессам были задние зоны лёгких, что согласуется с гравитационными закономерностями распределения вентиляции и перфузии в положении лёжа на спине. Ключевым

наблюдением стало то, что синдром альвеолярной консолидации у этих пациентов чаще всего представлен двумя основными формами: консолидацией без воздушных бронхограмм (признак полной деаэрации, ателектаза) и консолидацией с динамическими воздушными бронхограммами (признак частичной проходимости бронхов, гиповентиляции). Это позволяет говорить не просто о наличии консолидации, а о структурно-функциональной характеристике поражённого участка, что имеет прямое значение для выбора терапии. Локальный В+ синдром был слабо выражен, что свидетельствует о его второстепенной роли в патогенезе ОДН в данном контексте и опровергает гипотезу о его специфичности для вирусной пневмонии. Гидроторакс был выявлен у более чем половины пациентов (53,5 %) и чаще имел правостороннюю локализацию, в то время как пневмоторакс и нарушения подвижности диафрагмы регистрировались значительно реже.

В-третьих, был проведён детальный анализ информативности различных клинических и ультразвуковых параметров в диагностике ОДН. Корреляционный и регрессионный анализы подтвердили, что суммарные балльные оценки ультразвуковых синдромов обладают высокой диагностической ценностью. Ключевыми ультразвуковыми критериями обладающими наибольшей корреляцией с ОДН был синдром альвеолярной консолидации ($r = 0,66$) с наибольшей дискриминативной способностью при сумме баллов > 12 ($AUC = 0,899$) и интерстициальный синдром ($r = 0,61$) с высокой дискриминативной способностью при сумме баллов > 29 ($AUC = 0,870$). Однако, что особенно важно, анализ пространственной локализации выявил новую закономерность: наиболее информативными для диагностики ОДН в стадию ее клинической манифестации (4 оценочный период) являются изменения в латеральных зонах левого лёгкого. Наличие даже небольшой (≥ 1 балла) альвеолярной консолидации в латерально-нижней зоне левого лёгкого ассоциировано с 4,7-кратным увеличением шансов наличия ОДН. Эта находка в сочетании с данными о прогностических предикторах (локализованных преимущественно в правом лёгком) позволяет выдвинуть концепцию

двухэтапного формирования ОДН: на первом этапе (раннем, послеоперационном) системные повреждающие факторы наиболее выражено проявляются в правом лёгком, повреждение которого является маркером высокого риска дальнейшего развития ОДН, а на втором этапе (более позднем) более выраженное интраоперационное механическое повреждение в сочетании с системными повреждающими факторами ведут к нарастающему поражению левого лёгкого, что и становится основой для клинической манифестации синдрома. Эта гипотеза открывает новые горизонты для понимания патогенеза и требует дальнейших исследований.

В-четвёртых, в рамках исследования было проведено рандомизированное контролируемое исследование для оценки эффективности интенсивной терапии, корректируемой на основе данных УЗИ лёгких. Семьдесят один пациент был рандомизирован в исследуемую группу (терапия под УЗИ-контролем) и контрольную группу (стандартная терапия) при поступлении в стационар, до начала проведения лечения. Несмотря на то, что в исследуемой группе исходная выраженность (определяемая на 1 оценочном периоде) интерстициального синдрома была статистически значимо выше, применение персонализированного подхода привело к впечатляющим результатам. Частота развития ОДН в исследуемой группе составила 32,4 % против 86,5 % в контрольной ($p < 0,001$). У пациентов исследуемой группы также наблюдалось достоверное снижение выраженности как интерстициального синдрома, так и синдрома альвеолярной консолидации на 3 и 4 оценочных периодах, а также значимое улучшение газообмена, подтверждённое повышением индекса PaO_2 / FiO_2 ($p < 0,001$). Анализ безопасности показал, что предложенный алгоритм терапии не увеличивает частоту серьёзных послеоперационных осложнений. Повышение уровня креатинина в исследуемой группе, вероятно, связанное с более активным применением фуросемида, оставалось в пределах нормальных значений и было клинически незначимым. Таким образом, впервые было доказано, что динамический ультразвуковой мониторинг состояния лёгких, интегрированный в практику ведения кардиохирургических пациентов исследуемой категории,

позволяет не только диагностировать, но и эффективно и безопасно профилактировать развитие клинически значимой ОДН.

Таким образом, полученные в ходе исследования научные и практические данные позволили достичь поставленной цели – повысить качество и результативность интенсивной терапии у детей грудного возраста после радикальных кардиохирургических операций на основе диагностики и интенсивной терапии патологических процессов в лёгких для профилактики развития ОДН с использованием ультразвукового сканирования. Разработанный подход обладает высокой научной новизной, поскольку впервые интегрирует полный спектр ультразвуковых легочных синдромов в единый прогностический инструмент и доказывает возможность его использования не только для диагностики, но и для активной профилактики ОДН.

Стоит отметить, что данное исследование имеет ряд ограничений:

1) ограниченный размер выборки. Набор пациентов производился из расчета необходимой мощности исследования, однако они все равно являются относительно небольшими для обобщения выводов на всю популяцию детей грудного возраста после выполненных кардиохирургических вмешательств. Небольшая выборка могла повлиять на эффективность и обобщающую способность предиктивных моделей, а также на репрезентативность результатов;

2) ограниченная возрастная и нозологическая репрезентативность. В исследование включались только дети в возрасте от 1 до 12 месяцев с цианотическими формами ВПС, подвергшиеся плановой радикальной коррекции. Пациенты с цианотическими пороками, паллиативными вмешательствами, экстренными операциями, новорожденные и дети старше 1 года были исключены для повышения однородности выборки. Это сужает применимость полученных результатов к более широкой популяции кардиохирургических пациентов, у которых патофизиология ОДН может существенно отличаться;

3) одноцентровый характер исследования. Все данные получены в одном клиническом центре (Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии

г. Красноярск), что ограничивает внешнюю валидность результатов;

4) операторозависимость метода УЗИ лёгких. Несмотря на стандартизацию протокола и проведение сканирования лёгких одним исследователем (автором), УЗИ лёгких остаётся методом, чувствительным к уровню подготовки и субъективной интерпретации оператора;

5) отсутствие слепого дизайна при интерпретации результатов УЗИ. Поскольку все ультразвуковые сканирования лёгких проводились и интерпретировались одним исследователем (автором диссертации), отсутствовала возможность применения «слепого» метода оценки;

6) краткосрочный характер наблюдения. Исследование фокусировалось на раннем послеоперационном периоде до перевода пациентов из ОАРд в профильное отделение, что не позволяет оценить отдаленные исходы;

7) невозможность полного контроля за смешивающими факторами. Несмотря на рандомизацию, в условиях отделения анестезиологии и реанимации невозможно полностью стандартизировать все аспекты лечения, что могло внести дополнительный шум в анализ эффективности терапии;

8) пилотный характер прогностической модели и отсутствие внешней валидации. Хотя модель «LUCN-D» прошла внутреннюю валидацию на независимой подвыборке, её прогностическая способность не была протестирована в многоцентровых условиях, что ограничивает её обобщающую способность и готовность к широкому клиническому внедрению.

Перспективы дальнейших исследований включают проведение крупных многоцентровых рандомизированных контролируемых исследований для внешней валидации модели «LUCN-D». Целесообразно изучить возможность повышения прогностической точности модели за счёт интеграции дополнительных биомаркеров, таких как BNP и цистатин С. Одновременно представляется перспективным создание упрощённой скрининговой версии модели на основе наиболее значимых предикторов, что облегчит её внедрение в рутинную клиническую практику. Важным направлением является расширение критериев включения: охватить новорождённых, детей старше 1 года, а также

пациентов с цианотическими ВПС и перенесших паллиативные вмешательства с обязательной адаптацией критериев диагностики ОДН, поскольку традиционные показатели (PaO_2 / FiO_2 и SaO_2) в этих группах могут быть неинформативны. Необходимо также оценить влияние УЗИ-ориентированной терапии не только на частоту ОДН, но и на длительность госпитализации, а также стоимость пребывания в реанимации. Для обеспечения устойчивого и масштабируемого внедрения результатов исследования необходимо создание и внедрение стандартизированных образовательных программ для анестезиологов-реаниматологов по выполнению и интерпретации 12-зонного УЗИ лёгких у детей.

Таким образом, представленная работа вносит существенный вклад в решение актуальной проблемы профилактики и лечения ОДН у детей после радикальных кардиохирургических операций. Она демонстрирует потенциал современных технологий УЗИ и машинного обучения для персонализированной интенсивной терапии, что в конечном итоге направлено на улучшение качества и безопасности медицинской помощи самым уязвимым пациентам. Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе на кафедре анестезиологии и реаниматологии ИПО ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России, в практической работе отделения анестезиологии-реанимации детского Федерального центра сердечно-сосудистой хирургии г. Красноярск. Программный продукт «Прогностическая модель «LUCN-D» на основе ансамблевого алгоритма машинного обучения Random Forest» был защищён свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025661123 от 30.04.2025.

ВЫВОДЫ

1. Разработана, подвергнута внутренней валидации прогностическая модель «LUCN-D», имеющая высокую прогностическую эффективность (AUC = 0,929, чувствительность 100 %, специфичность 86,7 %) и определены независимые предикторы острой дыхательной недостаточности в послеоперационном периоде у детей после радикальных кардиохирургических операций на основе ультразвуковой картины лёгких. Наиболее ценными для прогноза являются признаки, выявляемые в заднем отделе правого лёгкого: наличие синдрома альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм любого размера в задне-нижней зоне (ОШ 3,26, AUC 0,766), синдром альвеолярной консолидации с любым типом воздушных бронхограмм выраженностью более 1 балла в задне-нижней зоне (ОШ 2,47, AUC 0,753) и задне-верхней зоне выраженностью более 2 баллов (ОШ 2,56, AUC 0,721), интерстициальный синдром в задне-верхней зоне выраженностью более 3 баллов (ОШ 2,89, AUC 0,707) и наличие синдрома альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм любого размера в задне-верхней зоне (ОШ 2,22, AUC 0,691).

2. Ультразвуковая семиотика патологических изменений у детей с острой дыхательной недостаточностью после кардиохирургических вмешательств характеризуется сочетанием интерстициального синдрома тяжелой степени, выраженного синдрома альвеолярных консолидаций без воздушных бронхограмм и с динамическими воздушными бронхограммами. Гидроторакс был зарегистрирован у 23 (53,5 %) пациентов с острой дыхательной недостаточностью и чаще был правосторонним, а наиболее подвержены патологическим процессам оказались задние зоны лёгких.

3. Наиболее информативным для диагностики острой дыхательной недостаточности оказался синдром альвеолярной консолидации, особенно локализованный в латеральных зонах левого легкого. Ключевыми ультразвуковыми критериями, обладающими наибольшей корреляцией с острой

дыхательной недостаточностью, были синдром альвеолярной консолидации ($r = 0,66$) с наибольшей дискриминативной способностью при сумме баллов > 12 ($AUC = 0,899$) и интерстициальный синдром ($r = 0,61$) с высокой дискриминативной способностью при сумме баллов > 29 ($AUC = 0,870$).

4. Интенсивная терапия, проводимая на основании данных ультразвукового исследования лёгких, статистически значимо снижает частоту развития острой дыхательной недостаточности (32,4 % в исследуемой против 86,5 % в контрольной группе, $p < 0,001$), уменьшает выраженность интерстициального синдрома как на 3 оценочном периоде: $(25,91 \pm 6,72)$ балла в исследуемой группе против $(29,76 \pm 5,30)$ балла в контрольной, ($p = 0,009$), так и на 4 оценочном периоде: $(25,18 \pm 5,49)$ против $(30,38 \pm 5,51)$ балла соответственно ($p < 0,001$), уменьшает выраженность синдрома альвеолярной консолидации как на 3 оценочном периоде: $(9,32 \pm 5,57)$ балла в исследуемой группе против $16,11 \pm 5,51$ в контрольной ($p < 0,001$), так и на 4 оценочном периоде: $(9,44 \pm 5,46)$ против $(17,51 \pm 6,05)$ балла соответственно ($p < 0,001$), а также улучшает газообмен как на 3 оценочном периоде: индекс $PaO_2/FiO_2 = 311,50$ (286,25; 346,00) в исследуемой группе против 242,90 (214,30; 286,00) в контрольной ($p < 0,001$), так и на 4 оценочном периоде: $316,67 \pm 38,99$ против $239,22 \pm 50,86$ соответственно ($p < 0,001$), что свидетельствует о эффективности интенсивной терапии, проводимой на основании данных ультразвукового исследования лёгких.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В повседневной клинической практике целесообразно включить стандартизированный 12-зонный протокол ультразвукового исследования лёгких в алгоритм мониторинга детей грудного возраста в раннем послеоперационном периоде после радикальных кардиохирургических операций. Особое внимание следует уделять задним и латеральным отделам лёгких, где наиболее часто локализуются прогностически и диагностически значимые изменения.

2. Для раннего выявления пациентов с высоким риском развития острой дыхательной недостаточности целесообразно использовать прогностическую модель «LUCH-D».

3. При проведении ультразвукового сканирования лёгких в первые 2 часа после поступления ребенка в отделение анестезиологии-реанимации после радикальной кардиохирургической операции (2 оценочный период) особое внимание следует уделять заднему отделу правого легкого. Выявление синдрома альвеолярной консолидации без воздушных бронхограмм в задне-нижней и задне-верхней зонах правого лёгкого любого размера, синдрома альвеолярной консолидации с любым типом воздушной бронхограмм в задне-нижней зоне при выраженности более 1 балла и в задне-верхней зоне при выраженности более 2 баллов, а также интерстициального синдрома при выраженности более 3 баллов в задне-верхней зоне правого легкого должно рассматриваться как независимые предикторы высокого риска развития острой дыхательной недостаточности и служить основанием для раннего начала превентивной персонафицированной интенсивной терапии с наибольшим вниманием к этим зонам.

4. При проведении ультразвукового исследования лёгких у детей в раннем послеоперационном периоде позже, чем в течение 2 часов после радикальных кардиохирургических вмешательств рекомендуется:

а) оценивать суммарную выраженность синдрома альвеолярной консолидации и интерстициального синдрома по 12-зонной методике;

б) пороговые значения ≥ 12 баллов для синдрома альвеолярной консолидации и ≥ 29 баллов для интерстициального синдрома следует рассматривать как высокий риск наличия острой дыхательной недостаточности и основание для немедленной коррекции интенсивной терапии;

в) особое внимание уделять латеральным отделам лёгких, особенно латерально-верхней и латерально-нижней зонам левого лёгкого, где даже небольшая выраженность синдрома альвеолярной консолидации (более 1 балла) многократно повышает шансы выявления острой дыхательной недостаточности.

5. Рекомендуется персонифицированный подход к интенсивной терапии на основе ультразвуковых данных:

а) при выявлении интерстициального синдрома средней и более выраженной степени – назначение дробной или непрерывной диуретической терапии фуросемидом с ультразвуковым контролем в динамике, коррекция онкотического давления при гипопроотеинемии;

б) при наличии синдрома альвеолярной консолидации – применение рекрутмент-манёвра под ультразвуковым контролем, индивидуальная настройка уровня положительного давления в конце выдоха, позиционирование пациента, вибрационный массаж грудной клетки и адекватная санация дыхательных путей;

в) при плевральном выпоте менее 5 мл/кг (малый плевральный выпот) рекомендуется придерживаться консервативной тактики (петлевые диуретики и ограничение инфузии) с последующим ультразвуковым контролем. При объеме 5–10 мл/кг (умеренный плевральный выпот) рекомендуется рассмотреть дренирование плевральной полости, исходя из выраженности острой дыхательной недостаточности и клинического состояния пациента, необходима консультация детского кардиохирурга. При более значительных объемах (массивный плевральный выпот) рекомендуется выполнять дренирование плевральной полости;

г) при выявлении малого пневмоторакса необходимо

динамическое наблюдение, при умеренном и массивном требуется хирургическое дренирование.

6. Обучение медицинского персонала стандартизированным методикам проведения и интерпретации ультразвукового исследования лёгких у детей после кардиохирургических вмешательств с использованием детализированной балльной системы оценки.

Пространственная локализация изменений имеет важное диагностическое значение. Наиболее информативными зонами оказались латеральные зоны левого лёгкого, что в сочетании с данными исследования, подробно описанного в разделе 3.3, может говорить о новых, ранее не изученных, двухэтапных механизмах формирования и развития острой дыхательной недостаточности. Полученные данные позволяют рекомендовать целенаправленное ультразвуковое сканирование этих зон в рамках комплексной оценки респираторного статуса и могут способствовать более точной персонализации интенсивной терапии и оптимизации динамического наблюдения за респираторным статусом у детей с подозрением на острую дыхательную недостаточность. Требуются дальнейшие исследования.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВДП	верхние дыхательные пути
ВПС	врождённый порок сердца
ДМЖП	дефект межжелудочковой перегородки
ДМПП	дефект межпредсердной перегородки
ИВЛ	искусственная вентиляция лёгких
ИК	искусственное кровообращение
иКДО ЛЖ	индекс конечно-диастолического объёма левого желудочка
КСЛА	клапанный стеноз легочной артерии
МВЛ	механическая вентиляция лёгких
МГц	мегагерц
МКК	малый круг кровообращения
МЛО	модель логистической регрессии
ММО	модель машинного обучения
НРС	нарушения ритма сердца
ОАП	открытый артериальный проток
ОДН	острая дыхательная недостаточность
ООО	открытое овальное окно
ОРДС	острый респираторный дистресс-синдром
ПДКВ	положительное давление в конце выдоха
СДЛА	систолическое давление в лёгочной артерии
СЛР	сердечно-лёгочная реанимация
ТБД	трахеобронхиальное дерево
УЗИ	ультразвуковое исследование
ФВЛЖ	фракция выброса левого желудочка
ФУД	фракция утолщения диафрагмы
ЭКМО	экстракорпоральная мембранная оксигенация
ЭХОКГ	эхокардиография

BLUE-протокол	Bedside Lung Ultrasound in Emergency
B-режим	режим ультразвукового сканирования Brightness mode
CPAP	Continuous Positive Airway Pressure
FiO ₂	фракция кислорода во вдыхаемом воздухе
I:E	отношение вдоха к выдоху
LUCH-D	Lung Ultrasound in Congenital Heart Disease
LUSNEHDI	Lung Ultrasound in Neonatal Congenital Heart Disease
MAC	Minimum Alveolar Concentration
M-режим	режим ультразвукового сканирования Motion mode
PaO ₂	парциальное давление кислорода в газах артериальной крови
PaO ₂ /FiO ₂	респираторный индекс (индекс оксигенации)
PCV	режим принудительной вентиляции с контролем по давлению
Pplat	plateau pressure.
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
SaO ₂	сатурация артериальной крови
SpO ₂	перкутанная сатурация

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрович, Ю. С. Респираторная поддержка при критических состояниях в педиатрии и неонатологии / Ю. С. Александрович, К. В. Пшениснов // М. : ГЭОТАР-Медиа. – 2020. – Т. 96.
2. Александрович, Ю. С. Седация и анальгезия во время манипуляций у детей / Ю. С. Александрович, К. В. Пшениснов, И. В. Александрович // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. – 2020. – Т. 10. – № 1. – С. 103–112.
3. Бокерия, Л. А. Клинические рекомендации по ведению детей с врожденными пороками сердца / Л. А. Бокерия // М. : НЦССХ им. А. Н. Бакулева. – 2014. – С. 342.
4. Ведение детей с заболеванием, вызванным новой коронавирусной инфекцией (SARS-CoV-2) / Ю. С. Александрович, Е. Н. Байбарина, А. А. Баранов [и др.] // Педиатрическая фармакология. – 2020. – Т. 17. – № 2. – С. 103–118.
5. Интенсивная терапия в детской кардиохирургии : практическое руководство / М. Б. Гонсалес-Гонсалес, К. Юкс, Д. Кловер [и др.] ; пер. с англ. – Москва : ООО «Издательская группа : ГЭОТАР-Медиа, 2023. – 704 с.
6. Методика и семиотика ультразвукового исследования легких у детей в отделении анестезиологии и реанимации / А. А. Пфейфер, С. А. Гурченко, К. А. Ильиных [и др.] // Анестезиология и реаниматология. – 2025. – № 2. – С. 90–100.
7. Мороз, В. В. Отек легких: классификация, механизмы развития, диагностика / В. В. Мороз, А. М. Голубев, А. Н. Кузовлев // Общая реаниматология. – 2009. – Т. 5. – № 1. – С. 83–88.
8. Овчаренко, С. И. Плевральный выпот: вопросы диагностики / С. И. Овчаренко, Е. А. Сон // Consilium medicum. – 2009. – Т. 11. – № 3.
9. Особенности ультразвуковой семиотики пневмоний у детей разного возраста / Д. В. Сафонов, Т. И. Дианова, Э. В. Бушуева, Н. В. Николаева // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 1115–1115.

10. Периоперационное ведение пациентов с дыхательной недостаточностью: методические рекомендации Общероссийской общественной организации «Федерация анестезиологов и реаниматологов» / И. Б. Заболотских, А. И. Грицан, М. Ю. Киров [и др.] // Вестник интенсивной терапии имени А. И. Салтанова. – 2022. – № 4. – С. 7–23.

11. Профилактика дыхательных осложнений у пациентов с риском неблагоприятных респираторных событий путем периоперационной доставки оксида азота при кардиохирургических операциях в условиях искусственного кровообращения: одноцентровое проспективное рандомизированное исследование / И. В. Кравченко, Ю. К. Подоксенов, М. А. Тё [и др.] // Патология кровообращения и кардиохирургия. – 2024. – Т. 28. – № 3. – С. 78–93.

12. Распространенность и структура острой дыхательной недостаточности в раннем послеоперационном периоде кардиохирургических вмешательств / А. Е. Баутин, И. Ю. Кашерининов, Д. А. Лалетин [и др.] // Вестник интенсивной терапии имени А. И. Салтанова. – 2016. – № 4. – С. 19–26.

13. Ультразвуковая диагностика легких у недоношенных новорожденных / С. В. Нефедов, Т. М. Черняева, С. М. Торчило, Я. Р. Саттиева // Неонатология: Новости. Мнения. Обучение. – 2020. – Т. 8. – № 1 (27). – С. 61–66.

14. Ультразвуковая навигация в педиатрических отделениях реанимации и интенсивной терапии: реалии настоящего времени / Ю. С. Александрович, К. В. Пшениснов, К. Ю. Ермоленко [и др.] // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. – 2023. – Т. 13. – № 3. – С. 361–372.

15. Ультразвуковое исследование легких в отделении анестезиологии-реанимации детского кардиохирургического профиля: обзор литературы / А. И. Грицан, А. А. Пфейфер, С. А. Гурченко [и др.] // Вестник интенсивной терапии имени А. И. Салтанова. – 2024. – № 3. – С. 161–176.

16. Факторы риска продлённой искусственной вентиляции лёгких в кардиохирургии / С. В. Крашенинников, И. А. Беляев, С. К. Божеску [и др.] // Анестезиология и реаниматология. – 2017. – Т. 62. – № 6. – С. 419–423.

17. Хэнсли, Ф. А. Практическая кардиоанестезиология / Ф. А. Хэнсли,

Д. Е. Мартин, Г. П. Грэвли ; пер. с англ. – 5-е изд. – Москва : ООО «Медицинское информационное агентство», 2017. – 848 с.

18. Шабалов, Н. П. Неонатология : учебное пособие : в 2 т. / Н. П. Шабалов. – 3-е изд., исправленное и дополненное. – Москва : МЕДпресс-информ, 2004. – 608 с. – ISBN 5-98322-032-2.

19. Эхографическая оценка плеврального выпота у детей / Е. Б. Ольхова, Д. В. Хаспеков, А. С. Сап, Е. В. Кузнецова // Радиология-практика. – 2020. – № 6. – С. 16–30.

20. 2013 ACCF/AHA guideline for the management of heart failure: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines / C. W. Yancy, M. Jessup, B. Bozkurt [et al.] // Journal of the American college of cardiology. – 2013. – Т. 62. – № 16. – С. e147–e239.

21. A narrative review of diaphragmatic ultrasound in pediatric critical care / M. D. Weber, J. K. Lim, C. Glau [et al.] // Pediatric Pulmonology. – 2021. – Т. 56. – № 8. – С. 2471–2483.

22. A novel sonographic sign of paradoxical movement of diaphragmatic paralysis in pediatric patients after cardiovascular surgery / T. Hosokawa, Y. Tanami, Y. Sato [et al.] // Radiology Case Reports. – 2021. – Т. 16. – № 4. – С. 777–784.

23. Abdel Rahman, D. A. Diaphragm and lung ultrasound indices in prediction of outcome of weaning from mechanical ventilation in pediatric intensive care unit / D. A. Abdel Rahman, S. Saber, A. El-Maghraby // The Indian Journal of Pediatrics. – 2020. – Т. 87. – № 6. – С. 413–420.

24. Accuracy of transthoracic lung ultrasound for diagnosing anesthesia-induced atelectasis in children / C. M. Acosta, G. A. Maidana, D. Jacovitti [et al.] // Anesthesiology. – 2014. – Т. 120. – № 6. – С. 1370–1379.

25. Arslan, G. Point of care diaphragm ultrasound in mechanically ventilated children: a predictive tool to detect extubation failure / G. Arslan, T. Besci, M. Duman // Pediatric Pulmonology. – 2022. – Т. 57. – № 6. – С. 1432–1439.

26. Assessment of extravascular lung water by ultrasound after congenital cardiac surgery / A. K. Kaskinen, L. Martelius, T. Kirjavainen [et al.] // Pediatric

Pulmonology. – 2017. – T. 52. – № 3. – C. 345–352.

27. Badenes, R. Postoperative pulmonary dysfunction and mechanical ventilation in cardiac surgery / R. Badenes, A. Lozano, F. J. Belda // Critical care research and practice. – 2015. – T. 2015. – № 1. – C. 420513.

28. Bajracharya, S. M. Comparison of Lung Ultrasound to X-ray for Diagnosis of Pulmonary Complications after Cardiac Surgery in Children / S. M. Bajracharya, P. Shrestha, A. Sharma // Journal of Nepal Health Research Council. – 2020. – T. 18. – № 1. – C. 47–51.

29. Bedside ultrasound for the diagnosis of abnormal diaphragmatic motion in children after heart surgery / L. Gil-Juanmiquel, M. Gratacós, Y. Castilla-Fernández [et al.] // Pediatric Critical Care Medicine. – 2017. – T. 18. – № 2. – C. 159–164.

30. Can lung ultrasound replace chest radiography for the diagnosis of pneumonia in hospitalized children? / F. Reali, G. F. Sferrazza Papa, P. Carlucci [et al.] // Respiration. – 2014. – T. 88. – № 2. – C. 112–115.

31. Cattarossi, L. Lung ultrasound: its role in neonatology and pediatrics / L. Cattarossi // Early Human Development. – 2013. – T. 89. – C. S17–S19.

32. Chest radiography of acute paediatric lower respiratory infections: experience versus interobserver variation / Y. Levinsky, F. B. Mimouni., D. Fisher, M. Ehrlichman // Acta Paediatrica. – 2013. – T. 102. – № 7. – C. e310–e314.

33. Clinical chest ultrasound: from the ICU to the bronchoscopy suite / C. T. Bolliger, T. Miyazawa, P. H. Mayo, F. J. Herth. – 2009.

34. Combined Echocardiography and Lung Ultrasound for Extubation Outcome Prediction in Children after Cardiac Surgery / M. Li, H. Meng, L. Zhang [et al.] // Congenital Heart Disease. – 2022. – T. 17. – № 3. – C. 231–44.

35. Community-acquired pneumonia: a correlative study between chest radiographic and HRCT findings / N. Tanaka, T. Emoto, H. Suda [et al.] // Japanese journal of radiology. – 2015. – T. 33. – № 6. – C. 317–328.

36. Copetti, R. The ‘double lung point’: an ultrasound sign diagnostic of transient tachypnea of the newborn / R. Copetti, L. Cattarossi // Neonatology. – 2007. – T. 91. – № 3. – C. 203–209.

37. Diagnosing acute heart failure in the emergency department: a systematic review and meta- analysis / J. L. Martindale, A. Wakai, S. P. Collins [et al.] // *Academic emergency medicine.* – 2016. – T. 23. – № 3. – C. 223–242.
38. Diagnosis of neonatal transient tachypnea and its differentiation from respiratory distress syndrome using lung ultrasound / J. Liu, Y. Wang, W. Fu [et al.] // *Medicine.* – 2014. – T. 93. – № 27. – C. e197.
39. Diagnostic accuracy and prognostic valued of plasmatic Cystatin-C in children undergoing pediatric cardiac surgery / M. Cantinotti, R. Giordano, M. Scalese [et al.] // *Clinica Chimica Acta.* – 2017. – T. 471. – C. 113–118.
40. Diagnostic accuracy and reproducibility of pleural and lung ultrasound in discriminating cardiogenic causes of acute dyspnea in the emergency department / G. A. Cibinel, G. Casoli, F. Elia [et al.] // *Internal and emergency medicine.* – 2012. – T. 7. – № 1. – C. 65–70.
41. Diaphragmatic atrophy and dysfunction in critically ill mechanically ventilated children / S. Mistri, N. Dhochak, M. Jana [et al.] // *Pediatric pulmonology.* – 2020. – T. 55. – № 12. – C. 3457–3464.
42. Diaphragmatic paralysis after cardiac surgery in children: incidence, prognosis and surgical management / T. H. Akay, S. Ozkan, B. Gultekin [et al.] // *Pediatric surgery international.* – 2006. – T. 22. – № 4. – C. 341–346.
43. Diaphragmatic thickening fraction by ultrasound in mechanically ventilated pediatric patients: pilot observations during spontaneous breathing trials / A. J. Shah, K. Wai, M. P. Sharron [et al.] // *Journal of Ultrasound in Medicine.* – 2022. – T. 41. – № 12. – C. 3043–3050.
44. Early fluid loading in acute respiratory distress syndrome with septic shock deteriorates lung aeration without impairing arterial oxygenation: a lung ultrasound observational study / F. P. Caltabeloti, A. Monsel, C. Arbelot [et al.] // *Critical care.* – 2014. – T. 18. – № 3. – C. R91.
45. Effectiveness of chest radiography, lung ultrasound and thoracic computed tomography in the diagnosis of congestive heart failure / L. Cardinale, A. M. Priola, F. Moretti [et al.]. // *World journal of radiology.* – 2014. – T. 6. – № 6. – C. 230.

46. Effectiveness of postural lung recruitment on postoperative atelectasis assessed by lung ultrasound in children undergoing lateral thoracotomy cardiac surgery with cardiopulmonary bypass / P. He, C. Wu, Y. Yang [et al.] // *Pediatric Pulmonology*. – 2021. – T. 56. – № 6. – C. 1724–1732.
47. Evaluation of diaphragmatic function in mechanically ventilated children: an ultrasound study / E. P. Lee, S. H. Hsia, H. F. Hsiao [et al.] // *PloS one*. – 2017. – T. 12. – № 8. – C. e0183560.
48. Explainable machine-learning predictions for complications after pediatric congenital heart surgery / X. Zeng, Y. Hu, L. Shu [et al.] // *Scientific reports*. – 2021. – T. 11. – № 1. – C. 17244.
49. First-line diagnosis of paediatric pneumonia in emergency: lung ultrasound (LUS) in addition to chest-X-ray (CXR) and its role in follow-up / S. Ianniello, C. L. Piccolo, G. L. Buquicchio [et al.] // *The British journal of radiology*. – 2016. – T. 89. – № 1061. – C. 20150998.
50. Gargani, L. Interstitial syndrome / L. Gargani // *Thoracic ultrasound (ERS monograph)* / ed. by C. B. Laursen, N. M. Rahman, G. Volpicelli. – Sheffield : European Respiratory Society, 2018. – P. 75–86.
51. Incidence and treatment of diaphragmatic paralysis after cardiac surgery in children / A. L. Joho-Arreola, U. Bauersfeld, U. G. Stauffer [et al.] // *European journal of cardio-thoracic surgery*. – 2005. – T. 27. – № 1. – C. 53–57.
52. Integrated use of bedside lung ultrasound and echocardiography in acute respiratory failure: a prospective observational study in ICU / B. Bataille, B. Riu, F. Ferre [et al.] // *Chest*. – 2014. – T. 146. – № 6. – C. 1586–1593.
53. International evidence-based recommendations for point-of-care lung ultrasound / G. Volpicelli, M. Elbarbary, M. Blaivas [et al.] // *Intensive care medicine*. – 2012. – T. 38. – № 4. – C. 577–591.
54. Lichtenstein, D. A. BLUE-protocol and FALLS-protocol: two applications of lung ultrasound in the critically ill / D. A. Lichtenstein // *Chest*. – 2015. – T. 147. – № 6. – C. 1659–1670.
55. Lichtenstein, D. A. Lung ultrasound in the critically ill neonate /

D. A. Lichtenstein, P. Mauriat // *Current pediatric reviews*. – 2012. – Т. 8. – № 3. – С. 217–223.

56. Lichtenstein, D. A. The dynamic air bronchogram: a lung ultrasound sign of alveolar consolidation ruling out atelectasis / D. A. Lichtenstein, G. Mezière, J. Seitz // *Chest*. – 2009. – Т. 135. – № 6. – С. 1421–1425.

57. LUCAS (lung ultrasonography in cardiac surgery) score to monitor pulmonary edema after congenital cardiac surgery in children / M. Girona-Alarcón, A. Cuaresma-González, J. Rodríguez-Fanjul [et al.] // *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*. – 2022. – Т. 35. – № 6. – С. 1213–1218.

58. LUCH-D—прогностическая модель развития острой дыхательной недостаточности в послеоперационный период у детей грудного возраста после радикальных кардиохирургических операций на основе оригинального протокола ультразвукового исследования легких: пилотное рандомизированное контролируемое исследование / А. А. Пфейфер, А. Ю. Миллер, С. А. Гурченко [и др.] // *Вестник интенсивной терапии имени А. И. Салтанова*. – 2025. – № 2. – С. 125–144.

59. Lung dysfunction following cardiopulmonary bypass / E. Apostolakis, K. S. Filos, E. Koletsis, D. Dougenis // *Journal of cardiac surgery*. – 2010. – Т. 25. – № 1. – С. 47–55.

60. Lung ultrasonography to diagnose transient tachypnea of the newborn / J. Liu, X. X. Chen, X. W. Li [et al.] // *Chest*. – 2016. – Т. 149. – № 5. – С. 1269–1275.

61. Lung ultrasound assessment of atelectasis following different anesthesia induction techniques in pediatric patients: a propensity score-matched, observational study / A. Camporesi, G. Roveri, L. Vetrugno [et al.] // *Journal of anesthesia, analgesia and critical care*. – 2024. – Т. 4. – № 1. – С. 69.

62. Lung ultrasound compared with bedside chest radiography in a paediatric cardiac intensive care unit / T. Hasan, S. Bonetti, A. Gioachin [et al.] // *Acta Paediatrica*. – 2021. – Т. 110. – № 4. – С. 1335–1340.

63. Lung ultrasound evaluation of incremental PEEP recruitment maneuver in children undergoing cardiac surgery / L. Sun, L. Wu, K. Zhang [et al.] // *Pediatric*

pulmonology. – 2020. – T. 55. – № 5. – C. 1273–1281.

64. Lung ultrasound for the diagnosis of pneumonia in children: a meta-analysis / M. A. Pereda, M. A. Chavez, C. C. Hooper-Miele [et al.] // *Pediatrics*. – 2015. – T. 135. – № 4. – C. 714–722.

65. Lung Ultrasound in Neonates: An Emerging Tool for Monitoring Critically Ill Infants / A. Verma, A. Paul, A. M. Tekleab [et al.] // *Newborn*. – 2023. – Vol. 18. – № 1. – P. 80–90.

66. Lung ultrasound in respiratory distress syndrome: a useful tool for early diagnosis / R. Copetti, L. Cattarossi, F. Macagno [et al.] // *Neonatology*. – 2008. – T. 94. – № 1. – C. 52–59.

67. Lung ultrasound in the diagnosis and monitoring of community acquired pneumonia in children / E. Urbankowska, K. Krenke, Ł. Drobczyński [et al.] // *Respiratory medicine*. – 2015. – T. 109. – № 9. – C. 1207–1212.

68. Lung ultrasound in the evaluation of neonatal respiratory distress syndrome / H. Xin, L. Wang, W. Hao [et al.] // *Journal of Ultrasound in Medicine*. – 2023. – T. 42. – № 3. – C. 713–721.

69. Lung ultrasound performed by primary care physicians for clinically suspected community-acquired pneumonia: A multicenter prospective study / F. J. Rodríguez-Contreras, A. Calvo-Cebrián, J. Díaz-Lázaro [et al.] // *The Annals of Family Medicine*. – 2022. – T. 20. – № 3. – C. 227–236.

70. Lung ultrasound reclassification of chest X-ray data after pediatric cardiac surgery / M. Cantinotti, L. Ait Ali, M. Scalese [et al.] // *Pediatric Anesthesia*. – 2018. – T. 28. – № 5. – C. 421–427.

71. Lung ultrasound to detect pneumothorax in children evaluated for acute chest pain in the emergency department: an observational pilot study / B. Scialanga, D. Buonsenso, S. Scateni [et al.] // *Frontiers in pediatrics*. – 2022. – T. 10. – C. 812246.

72. Lung ultrasound-implemented diagnosis of acute decompensated heart failure in the ED / E. Pivetta, A. Goffi, E. Lupia [et al.] // *Chest*. – 2015. – T. 148. – № 1. – C. 202–210.

73. Lung water assessment by lung ultrasonography in intensive care: a pilot

study / G. Baldi, L. Gargani, A. Abramo [et al.]. // Intensive care medicine. – 2013. – T. 39. – № 1. – C. 74–84.

74. Machine learning prediction model of major adverse outcomes after pediatric congenital heart surgery: a retrospective cohort study / C. Tong, X. Du, Y. Chen [et al.] // International Journal of Surgery. – 2024. – T. 110. – № 4. – C. 2207–2216.

75. Matthay, M. A. Respiratory management after cardiac surgery / M. A. Matthay, J. P. Wiener-Kronish // Chest. – 1989. – T. 95. – № 2. – C. 424–34.

76. Modified lung ultrasound examinations in assessment and monitoring of positive end-expiratory pressure-induced lung reaeration in young children with congenital heart disease under general anesthesia / L. Wu, Q. Hou, J. Bai [et al.] // Pediatric Critical Care Medicine. – 2019. – T. 20. – № 5. – C. 442–449.

77. Mohammed, A. K. Furosemide: Would it help to improve the lungs as evaluated by sonography and compliance during aortic coarctation surgery / A. K. Mohammed, M. A. Madkour, H. M. Hassanien // Annals of Cardiac Anaesthesia. – 2019. – T. 22. – № 3. – C. 254–259.

78. Muscle atrophy in mechanically-ventilated critically ill children / R. W. Johnson, K. W. Ng, A. R. Dietz [et al.] // PLoS One. – 2018. – T. 13. – № 12. – C. e0207720.

79. Neonatal lung ultrasound exam guidelines / D. Kurepa, N. Zaghloul, L. Watkins, J. Liu // Journal of Perinatology. – 2018. – T. 38. – № 1. – C. 11–22.

80. Nozaki, Y. Ultrasonographic diagnosis of diaphragm paralysis in a neonate during mechanical ventilation after cardiac surgery / Y. Nozaki, L. Lin, Y. Kato // Cardiology in the Young. – 2018. – T. 28. – № 5. – C. 776–778.

81. Overview of lung ultrasound in pediatric cardiology / M. Cantinotti, P. Marchese, R. Giordano [et al.] // Diagnostics. – 2022. – T. 12. – № 3. – C. 763.

82. Performance of chest ultrasound in pediatric pneumonia / A. S. Claes, P. Clapuyt, R. Menten [et al.] // European journal of radiology. – 2017. – T. 88. – C. 82–87.

83. Performance of lung ultrasonography in children with community-acquired

pneumonia / S. Esposito, S. S. Papa, I. Borzani [et al.] // Italian journal of pediatrics. – 2014. – T. 40. – № 1. – C. 37.

84. Perioperative pulmonary atelectasis—part I: biology and mechanisms / C. Zeng, D. Lagier, J. W. Lee, M. F. Vidal Melo // Anesthesiology. – 2022. – T. 136. – № 1. – C. 181–205.

85. Point-of-care thoracic ultrasound in children: new advances in pediatric emergency setting / S. Bloise, A. Marcellino, M. Sanseviero [et al.] // Diagnostics. – 2023. – T. 13. – № 10. – C. 1765.

86. Polito, A. Point-of-care pleural and lung ultrasound in a newborn suffering from cardiac arrest due to tension pneumothorax after cardiac surgery / A. Polito, D. G. Biasucci, P. Cogo // Cardiology in the Young. – 2016. – T. 26. – № 2. – C. 400–402.

87. Postoperative diaphragmatic paralysis after cardiac surgery in children: incidence, diagnosis and surgical management / Y. B. Zhang, X. Wang, S. J. Li [et al.] // Chinese medical journal. – 2013. – T. 126. – № 21. – C. 4083–4087.

88. Postoperative phrenic nerve palsy in patients with open-heart surgery / O. N. Markand, S. S. Moorthy, Y. Mahomed [et al.] // The Annals of thoracic surgery. – 1985. – T. 39. – № 1. – C. 68–73.

89. Predictive value of diaphragmatic ultrasonography for the weaning outcome in mechanically ventilated children aged 1–3 years / Y. Yao, L. He, W. Chen [et al.] // Frontiers in Pediatrics. – 2022. – T. 10. – C. 840444.

90. Prognostic role of BNP in children undergoing surgery for congenital heart disease: analysis of prediction models incorporating standard risk factors / M. Cantinotti, R. Giordano, M. Scalese [et al.] // Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM). – 2015. – T. 53. – № 11. – C. 1839–1846.

91. Prognostic value of a new lung ultrasound score to predict intensive care unit stay in pediatric cardiac surgery / M. Cantinotti, R. Giordano, M. Scalese [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. – 2020. – T. 109. – № 1. – C. 178–184.

92. Progressive diaphragm atrophy in pediatric acute respiratory failure / C. L. Glau, T. W. Conlon, A. S. Himebauch [et al.] // Pediatric Critical Care Medicine. –

2018. – T. 19. – № 5. – C. 406–411.

93. Protocol and guidelines for point-of-care lung ultrasound in diagnosing neonatal pulmonary diseases based on international expert consensus / J. Liu, R. Copetti, E. Sorantin [et al.] // *J Vis Exp.* – 2019. – T. 145. – № 3. – C. e58990.

94. Regional distribution of ventilation and perfusion as a function of body position / K. Kaneko, J. Milic-Emili, M. B. Dolovich [et al.] // *Journal of Applied Physiology.* – 1966. – T. 21. – № 3. – C. 767–777.

95. Riccabona, M. Ultrasound of the chest in children (mediastinum excluded) / M. Riccabona // *European radiology.* – 2008. – T. 18. – № 2. – C. 390–399.

96. Role of lung ultrasound in the detection of postoperative pulmonary complications in pediatric patients: a prospective observational study / G. S. Ghotra, B. Kumar, S. G. Niyogi [et al.] // *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia.* – 2021. – T. 35. – № 5. – C. 1360–1368.

97. Role of ultrasound in predicting weaning failure in children undergoing cardiac surgery: Prospective observational study / A. Singh, B. Mandal, G. Puri [et al.] // *Authorea Preprints.* – 2020.

98. Romagnoli, S. Non-cardiac Surgery: Perioperative Echocardiography and Lung Echography / S. Romagnoli, C. Chelazzi, Z. Ricci // *Textbook of Echocardiography for Intensivists and Emergency Physicians.* – Cham : Springer International Publishing, 2019. – C. 445–452.

99. Shah, A. Application of dynamic air bronchograms on lung ultrasound to diagnose pneumonia in undifferentiated respiratory distress / A. Shah, C. Oliva, C. Stem // *Respiratory Medicine Case Reports.* – 2022. – T. 39. – C. 101706.

100. Shah, V. P. Prospective evaluation of point-of-care ultrasonography for the diagnosis of pneumonia in children and young adults / V. P. Shah, M. G. Tunik, J. W. Tsung // *JAMA pediatrics.* – 2013. – T. 167. – № 2. – C. 119–125.

101. Sonographic dynamic assessment of lung injury in a child with hypoplastic left heart syndrome undergoing extracorporeal membrane oxygenation / D. G. Biasucci, Z. Ricci, G. Conti, P. Cogo // *Pediatric Pulmonology.* – 2014. – T. 49. – № 12. – C. E147–E150.

102. Stadler, J. A. M. Lung ultrasound for the diagnosis of community-acquired pneumonia in children / J. A. M. Stadler, S. Andronikou, H. J. Zar // *Pediatric radiology*. – 2017. – T. 47. – № 11. – C. 1412–1419.

103. Standards for definitions and use of outcome measures for clinical effectiveness research in perioperative medicine: European Perioperative Clinical Outcome (EPCO) definitions: a statement from the ESA-ESICM joint taskforce on perioperative outcome measures / I. B. Jammer, N. Wickboldt, M. Sander [et al.] // *European Journal of Anaesthesiology*. – 2015. – T. 32. – № 2. – C. 88–105.

104. Subhash, S. Point-of-care ultrasound measurement of diaphragm thickening fraction as a predictor of successful extubation in critically ill children / S. Subhash, V. Kumar // *Journal of Pediatric Intensive Care*. – 2023. – T. 12. – № 02. – C. 131–136.

105. The comet-tail artifact: an ultrasound sign of alveolar-interstitial syndrome / D. A. Lichtenstein, G. Meziere, P. Biderman [et al.] // *American journal of respiratory and critical care medicine*. – 1997. – T. 156. – № 5. – C. 1640–1646.

106. The impact of critical illness on the expiratory muscles and the diaphragm assessed by ultrasound in mechanical ventilated children / M. M. IJland, J. Lemson, J. G. van der Hoeven, L. M. Heunks // *Annals of Intensive Care*. – 2020. – T. 10. – № 1. – C. 115.

107. The new application of point-of-care lung ultrasound in guiding or assisting neonatal severe lung disease treatment based on a case series / J. Liu, R. M. Xia, X. L. Ren, J. J. Li // *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*. – 2020. – T. 33. – № 23. – C. 3907–3915.

108. The predictive value of diaphragm ultrasound for weaning outcomes in critically ill children / Y. Xue, Z. Zhang, C. Q. Sheng [et al.] // *BMC Pulmonary Medicine*. – 2019. – T. 19. – № 1. – C. 270.

109. The role of lung ultrasound in diagnosis of respiratory distress syndrome in newborn infants / J. Liu, H. Y. Cao, H. W. Wang, X. Y. Kong // *Iranian journal of pediatrics*. – 2014. – T. 24. – № 2. – C. 147.

110. The role of lung ultrasound in preterm neonates with respiratory distress in neonatal intensive care unit / S. Swarup, R. Panigrahi, S. Swain, H. Agrawal // *Indian*

Journal of Child Health. – 2021. – T. 8. – № 8. – C. 284–288.

111. Towards a less invasive approach to the early goal-directed treatment of septic shock in the ED / D. Coen, F. Cortellaro, S. Pasini [et al.] // The American journal of emergency medicine. – 2014. – T. 32. – № 6. – C. 563–568.

112. Tsung, J. W. Prospective application of clinician-performed lung ultrasonography during the 2009 H1N1 influenza A pandemic: distinguishing viral from bacterial pneumonia / J. W. Tsung, D. O. Kessler, V. P. Shah // Critical ultrasound journal. – 2012. – T. 4. – № 1. – C. 16.

113. Ultrasonic prediction of weaning failure in children undergoing cardiac surgery: A prospective observational study / A. Singh, B. Mandal, S. Negi [et al.] // Annals of Cardiac Anaesthesia. – 2023. – T. 26. – № 3. – C. 281–287.

114. Ultrasound assessment of diaphragm thickness, contractility, and strain in healthy pediatric patients / C. L. Glau, E. E. Lin, T. W. Conlon [et al.] // Pediatric pulmonology. – 2024. – T. 59. – № 2. – C. 433–441.

115. Ultrasound assessment of ventilator-induced diaphragmatic dysfunction in mechanically ventilated pediatric patients / D. V. Montoro, P. G. Soler, A. H. Yuste, J. M. C. Alonso // Paediatric Respiratory Reviews. – 2021. – T. 40. – C. 58–64.

116. Ultrasound detection of pneumonia in febrile children with respiratory distress: a prospective study / M. Guerra, G. Cricchiutti, P. Pecile [et al.] // European journal of pediatrics. – 2016. – T. 175. – № 2. – C. 163–170.

117. Ultrasound diagnosis of alveolar consolidation in the critically ill / D. A. Lichtenstein, N. Lascols, G. Mezière, A. Gepner // Intensive care medicine. – 2004. – T. 30. – № 2. – C. 276–281.

118. Ultrasound diagnosis of occult pneumothorax / D. A. Lichtenstein, G. Mezière, N. Lascols [et al.] // Critical care medicine. – 2005. – T. 33. – № 6. – C. 1231–1238.

119. Ultrasound for diaphragmatic dysfunction in postoperative cardiac children / H. K. Hamadah, M. S. Kabbani, M. Elbarbary [et al.] // Cardiology in the Young. – 2017. – T. 27. – № 3. – C. 452–458.

120. Usefulness of lung ultrasound in neonatal congenital heart disease

(LUSNEHDI): lung ultrasound to assess pulmonary overflow in neonatal congenital heart disease / J. Rodríguez-Fanjul, A. S. Llop, M. Balaguer [et al.] // *Pediatric cardiology*. – 2016. – Т. 37. – № 8. – С. 1482–1487.

121. Usefulness of lung ultrasound in the diagnosis and follow-up of respiratory diseases in neonates / L. R. Fernández, R. G. Hernández, I. S. Guerediaga [et al.] // *Anales de Pediatría (English Edition)*. – 2022. – Т. 96. – № 3. – С. 252. e1–252. e13.

122. Usefulness of lung ultrasound in the diagnosis of community-acquired pneumonia in children / M. C. Ho, C. R. Ker, J. H. Hsu [et al.] // *Pediatrics & Neonatology*. – 2015. – Т. 56. – № 1. – С. 40–45.

123. Usefulness of ultrasound lung comets as a nonradiologic sign of extravascular lung water / Z. Jambrik, S. Monti, V. Coppola [et al.] // *The American journal of cardiology*. – 2004. – Т. 93. – № 10. – С. 1265–1270.

124. Utility of perioperative lung ultrasound in pediatric cardiac surgery / I. K. Song, E. H. Kim, J. H. Lee [et al.] // *Anesthesiology*. – 2018. – Т. 128. – № 4. – С. 718–727.

125. Vitale, V. Lung ultrasonography and pediatric cardiac surgery: first experience with a new tool for postoperative lung complications / V. Vitale, Z. Ricci, P. Cogo // *The Annals of Thoracic Surgery*. – 2014. – Т. 97. – № 4. – С. e121–e124.

126. Volpicelli, G. Sonographic diagnosis of pneumothorax / G. Volpicelli // *Intensive care medicine*. – 2011. – Т. 37. – № 2. – С. 224–232.

127. Weir I. Spearman's Rank Correlation – Introduction / I. Weir. – Текст : электронный – URL: <https://statstutor.ac.uk/resources/uploaded/spearmans.pdf> (дата обращения: 14.01.2026).

128. Wooten. W. M. Bedside ultrasound versus chest radiography for detection of pulmonary edema: a prospective cohort study / W. M. Wooten, L. E. T. Shaffer, L. A. Hamilton // *Journal of Ultrasound in Medicine*. – 2019. – Т. 38. – № 4. – С. 967–973.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

1. Рисунок 1 – Отбор исследований для систематического обзора в соответствии с рекомендациями PRISMA Checklist (схема). С. 20
2. Рисунок 2 – Нормальная ультразвуковая картина легкого. С. 25
3. Рисунок 3 – Интерстициальный синдром. С. 28
4. Рисунок 4 – Синдром альвеолярной консолидации. С. 32
5. Рисунок 5 – Схема-алгоритм ультразвуковой диагностики пневмоторакса. С. 37
6. Рисунок 6 – Симптом «морского берега» в М-режиме (Нормальный участок легкого). С. 38
7. Рисунок 7 – Пневмоторакс. Признак «штрих-кода» в М-режиме. . . С. 38
8. Рисунок 8 – Признаки гидроторакса. С. 40
9. Рисунок 9 – Измерение расстояния между участком легкого и грудной клеткой для модифицированной формулы Balik. С. 41
10. Рисунок 10 – Нормальное движение диафрагмы. С. 43
11. Рисунок – 11 – Парадоксальное движение диафрагмы. С. 44
12. Рисунок 12 – Парез (паралич) купола диафрагмы. С. 44
13. Рисунок 13 – Блок-схема дизайна исследования. С. 63
14. Рисунок 14 – Оценка выраженности интерстициального синдрома в баллах С. 66
15. Рисунок 15 – Участок альвеолярной консолидации с воздушной бронхограммой С. 67
16. Рисунок 16 – Локальный В+ синдром. С. 70
17. Рисунок 17 – Блок-схема дизайна исследования для описания ультразвуковой семиотики патологических изменений в лёгких у детей с ОДН, выявления взаимосвязи клинических и инструментальных данных с ОДН и оценки их диагностической ценности. С. 76
18. Рисунок 18 – Блок-схема дизайна исследования для оценки

	эффективности интенсивного лечения патологических процессов в лёгких с целью профилактики ОДН.	C. 77
19.	Рисунок 19 – Калибровочная кривая модели ММО (алгоритм машинного обучения). Brier Score 0,095.	C. 99
20.	Рисунок 20 – Результаты ROC-анализа предиктивных моделей до выполнения кросс-валидации.	C. 104
21.	Рисунок 21 – Confusion Matrix после выполнения кросс-валидации Монте-Карло с 1 000 итераций для предиктивной модели на основе логистической регрессии (верхняя матрица) и модели на основе машинного обучения (нижняя матрица).	C. 105
22.	Рисунок 22 – Визуализация выраженности ультразвуковых синдромов.	C. 121
23.	Рисунок 23 – Корреляция ультразвуковых показателей, инструментальных и демографических данных лёгких с ОДН.	C. 127
24.	Рисунок 24 – Корреляция ультразвуковых синдромов в определенных зонах лёгких с ОДН.	C. 128
25.	Рисунок 25 – Уменьшение выраженности синдрома альвеолярной консолидации в результате проведенного лечения (клинический пример 1).	C. 149
26.	Рисунок 26 – Уменьшение выраженности интерстициального синдрома в результате проведенного лечения (клинический пример 2).	C. 151
27.	Таблица 1 – Базовые характеристики пациентов (n = 60), включенных на пилотном этапе исследования.	C. 62
28.	Таблица 2 – Базовые характеристики общей выборки пациентов (n = 71)	C. 75
29.	Таблица 3 – Характеристика включенных пациентов согласно типу ВПС по характеру влияния на легочный кровоток.	C. 78
30.	Таблица 4 – Сравнение базовых характеристик пациентов обучающей и тестовой подвыборок.	C. 96

31. Таблица 5 – Сравнение базовых характеристик пациентов обучающей и калибровочной подвыборок. С. 97
32. Таблица 6 – Базовые характеристики пациентов тестовой подвыборки. С. 97
33. Таблица 7 – Однофакторный регрессионный анализ модели логистической регрессии. Статистически значимые факторы. С. 100
34. Таблица 8 – Сравнение предиктивных моделей. С. 106
35. Таблица 9 – Описание ультразвуковой картины лёгких у пациентов с острой дыхательной недостаточностью ($n = 43$). С. 116
36. Таблица 10 – Описание выраженности гидроторакса, пневмоторакса и характера движения диафрагмы у пациентов с острой дыхательной недостаточностью ($n = 43$). С. 119
37. Таблица 11 – Результаты однофакторного логистического регрессионного анализа. Статистически значимые факторы. (p -value < 0,05). С. 129
38. Таблица 12 – Характеристики ультразвуковых параметров для выявления ОДН со значениями псевдо- $R^2 > 0,2$ С. 132
39. Таблица 13 – Сравнение базовых характеристик пациентов между группами до выполнения операции (1 оценочный период). С. 141
40. Таблица 14 – Результаты сравнение групп по окончании первых реанимационных суток (3 оценочный период). С. 142
41. Таблица 15 – Результаты сравнения групп перед переводом в профильное отделение из отделения реанимации после 10-минутного теста дыхания атмосферным кислородом (4 оценочный период). С. 143
42. Таблица 16 – Структура послеоперационных осложнений в группах. С. 144