

<https://doi.org/10.24835/1607-0771-2021-4-38-56>

Вихревые турбулентные потоки и скручивание левого желудочка у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с низкой, очень низкой и экстремально низкой массой тела

Е.Н. Павлюкова¹, М.В. Колосова², Г.В. Неклюдова¹, Р.С. Карпов¹

¹ Научно-исследовательский институт кардиологии ФГБНУ
“Томский национальный исследовательский медицинский центр
Российской академии наук”, г. Томск

² ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет”
Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Томск

Цель: изучение характера вихревых потоков при различных типах скручивания левого желудочка в систолу у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с низкой, очень низкой и экстремально низкой массой тела.

Материал и методы: обследовано 25 детей в возрасте от 1 года до 5 лет, рожденных недоношенными с низкой, очень низкой и экстремально низкой массой тела. Ультразвуковое исследование сердца

выполнено на системе Vivid E95 (GE Healthcare, США) с использованием матричного датчика M5S (1,5–4,6 МГц) по стандартной методике. Кроме того, с помощью двухмерной спекл-трекинг эхокардиографии оценены типы скручивания левого желудочка, а с помощью технологии blood speckle imaging – потокогенная составляющая (характер вихревых потоков в конце диастолы и в фазу изометрического сокращения).

Е.Н. Павлюкова – д.м.н., профессор, заведующая отделением атеросклероза и хронической ишемической болезни сердца Научно-исследовательского института кардиологии ФГБНУ “Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук”, г. Томск. <https://orcid.org/0000-0002-3081-9477>

М.В. Колосова – д.м.н., профессор кафедры детских болезней ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Томск. <https://orcid.org/0000-0002-5550-5925>

Г.В. Неклюдова – аспирант Научно-исследовательского института кардиологии ФГБНУ “Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук”, г. Томск. <https://orcid.org/0000-0002-7556-9379>

Р.С. Карпов – д.м.н., профессор, академик РАН, научный руководитель Научно-исследовательского института кардиологии ФГБНУ “Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук”, г. Томск. <https://orcid.org/0000-0002-7011-4316>

Контактная информация: 634012 Томская обл., г. Томск, ул. Киевская, д. 111А, НИИ кардиологии Томского НИМЦ, отделение атеросклероза и хронической ишемической болезни сердца. Павлюкова Елена Николаевна. E-mail: pavlyukovaelena@yandex.ru

Результаты: первый тип скручивания (взрослый) отмечался у 11 из 25 (44%) детей, второй (детский) – у 4 (16%), третий (вариант детского) – у 4 (16%), четвертый (реверсивный) – у 6 (24%). Для первого (взрослого) типа скручивания левого желудочка ($n = 11$) в конце диастолы характерен доминирующий поток по направлению к верхушке вдоль задней стенки левого желудочка, далее поток крови движется по межжелудочковой перегородке в сторону аорты. В фазу изометрического сокращения кровотоки состоят из двух вихревых потоков, один из которых на верхушке, другой – на уровне папиллярных мышц. При втором и третьем (детских) типах скручивания левого желудочка ($n = 8$) в конце диастолы вихревой поток направлен в сторону верхушечного сегмента межжелудочковой перегородки, где делает поворот по направлению к задней стенке левого желудочка до уровня заднемедиальной папиллярной мышцы, а затем движется по направлению к аорте. При втором типе скручивания левого желудочка ($n = 4$) в фазу изометрического сокращения вихревой поток направлен от задней стенки в сторону межжелудочковой перегородки, второй поток на уровне папиллярных мышц отсутствует. При третьем типе скручивания левого желудочка ($n = 4$) в фазу изометрического сокращения доминирующий вихрь формируется на уровне папиллярных мышц по направлению к межжелудочковой перегородке, затем перемещается к верхушке, где образует завиток на стороне зад-

ней стенки левого желудочка на уровне верхушечных сегментов. При четвертом (реверсивном) типе скручивания левого желудочка ($n = 6$) в конце диастолы наблюдался рассыпной вихревой поток (по типу салюта) без выделения доминирующего вихря. В фазу изометрического сокращения регистрировался один вихревой поток, захватывающий уровни верхушки, папиллярных мышц и частично базальных сегментов.

Выводы: развитие различных вариантов вихревых потоков у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с низкой, очень низкой и экстремально низкой массой тела, является неотъемлемой частью процесса постнатального онтогенеза детского сердца при условии наличия фактора преждевременных родов в анамнезе.

Ключевые слова: двухмерная спекл-трекинг эхокардиография; ротация левого желудочка; скручивание левого желудочка; вихревой поток; blood speckle imaging; недоношенные дети; дети, рожденные с очень низкой массой тела; дети, рожденные с экстремально низкой массой тела.

Цитирование: Павлюкова Е.Н., Колосова М.В., Неклюдова Г.В., Карпов Р.С. Вихревые турбулентные потоки и скручивание левого желудочка у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с низкой, очень низкой и экстремально низкой массой тела. Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2021; 4: 38–56. <https://doi.org/10.24835/1607-0771-2021-4-38-56>

ВВЕДЕНИЕ

Вихревой поток играет важную роль в функции сердца, поскольку изменения потока являются важными детерминантами формирования морфологии, ремоделирования и эпигенетического программирования [1]. Во внутриутробный период различные модели кровотока в развивающемся сердце влияют на морфогенез, определяя внутрисердечную гемодинамику (потокотенную составляющую) [2] как ключевой фактор развития сердечно-сосудистой си-

стемы [1]. В постнатальный период сокращение левого желудочка (ЛЖ) в норме сопровождается возникновением феномена турбулентности с очень высокими скоростями – внутрижелудочкового “торнадо” или вихревых потоков [3]. Вихревой поток в полости ЛЖ представляет собой вращающуюся массу жидкости, характеризуется отсутствием зеркальной симметрии [1, 4] и возникает вследствие взаимодействия наполняющей струи крови со стенками ЛЖ [4]. Именно с диастолическими событиями

связано образование диастолического вихревого кольца, возникновение которого регулируется законами динамики жидкости, рассматриваемыми как имеющий первостепенное значение фактор эволюции, играющий важную роль в формообразовании сердца [5].

Показано, что вихревое заполнение кровью полости ЛЖ имеет прогностическое значение при сердечной недостаточности [6–8], оценке диастолической функции [9], а параметры потока коррелируют с геометрией полости ЛЖ и показателями деформации ЛЖ у взрослых пациентов с патологией сердца [6–8]. Нагрузка объемом в пределах полости ЛЖ может влиять на динамику диастолического вихревого потока на раннем этапе (в неонатальный период) жизни детей, рожденных недоношенными, а затем в последующем обуславливать ремоделирование ЛЖ с развитием сердечной патологии у взрослых, рожденных преждевременно [4, 10]. Наличие вихревого потока ассоциировано с сохранением кинетической энергии потока, поступающего в полость ЛЖ, и минимизацией напряжения сдвига, воздействующего на стенки ЛЖ, для повышения эффективности движения потока через выводной тракт ЛЖ в период систолы [11, 12]. Вихревой поток переносит больше массы крови, чем эквивалентная прямая струя жидкости, способствует высокой энергоэффективности [13, 14] и оптимизации предсердно-желудочкового соединения [4].

Появление новой ультразвуковой технологии *blood speckle imaging (BSI)* делает возможным прямую визуализацию сложных траекторий течения крови в полостях детского сердца, что важно для диагностики, определения прогнозов, понимания физиологии и патофизиологии различных моделей кровотока [1, 4]. Сочетание цветового доплеровского картирования с высокой частотой кадров и анализа отслеживания спеклов форменных элементов крови позволяет определить движение вихревого потока в полости ЛЖ в течение сердечного цикла [1, 15, 16]. Использование технологии *BSI* возможно при небольшой глубине проникновения ультразвукового луча, поэтому данная методика может выполняться именно в детском возрасте [1, 4].

Согласно данным В.А. Сандрикова и соавт. [3, 8], исследование вихревых потоков

крови в полостях сердца считается одним из подходов оценки сократительной функции миокарда через анализ градиента давления внутри полости с последующим расчетом потенциальной и кинетической энергий. Другим подходом оценки контрактильности ЛЖ является анализ механики ЛЖ путем определения ротации на уровне базальных, верхушечных сегментов, папиллярных мышц и скручивания ЛЖ. Ранее нами была предложена классификация типов скручивающего движения ЛЖ у здоровых детей и подростков в возрасте от одного месяца до восемнадцати лет, рожденных доношенными [17], и у детей раннего и дошкольного возраста, рожденных недоношенными с очень низкой массой тела (ОНМТ) и экстремально низкой массой тела (ЭНМТ) [18]. Данные о свойствах и состоянии вихревых потоков в полости ЛЖ в период диастолы у детей в зависимости от варианта систолического скручивающего движения ЛЖ в литературе отсутствуют.

Гипотеза исследования: различные типы скручивания ЛЖ в систолу и диастолу у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с низкой массой тела (НМТ), ОНМТ и ЭНМТ, характеризуются разнообразными вариантами диастолических вихревых потоков.

Цель исследования: изучить характер вихревых потоков при различных типах скручивания ЛЖ в систолу у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено у 25 детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ. Дети наблюдались в амбулаторных условиях детских поликлиник г. Томска и относились к группам диспансерного наблюдения I–II (согласно приказу Министерства здравоохранения РФ от 21 декабря 2012 г. №1346н “О порядке прохождения несовершеннолетними медицинских осмотров, в том числе при поступлении в образовательные учреждения и в период обучения в них” и приказу Министерства здравоохранения РФ от 10 августа 2017 г. №514н “О порядке проведения медицинских профи-

лактических осмотров несовершеннолетних”). К группе здоровья I (15 детей, из них 7 девочек и 8 мальчиков) относились дети, имеющие нормальное физическое развитие, не имеющие анатомических дефектов и морфофункциональных нарушений. Группа здоровья II (10 детей, из них 6 девочек и 4 мальчика) включала детей без хронических заболеваний, но с некоторыми функциональными и морфофункциональными нарушениями, такими как общая задержка физического развития, не связанная с заболеваниями эндокринной системы; частые респираторные заболевания; физические недостатки без нарушения функции органов и систем организма.

Критериями исключения служили: отказ родителей от обследования; внутриутробные инфекции; врожденные пороки сердца; группы здоровья III–IV; рождение с использованием вспомогательных репродуктивных технологий; период реконвалесценции после острых респираторных заболеваний менее 6 мес; отягощенный семейный анамнез по гипертрофической и дилатационной кардиомиопатии, ишемической болезни сердца, артериальной гипертензии; патологические изменения ЭКГ.

Дизайн настоящего исследования: плотное, одномоментное. Соответствие принципам этики: протокол исследования одобрен комитетом по биомедицинской этике Научно-исследовательского института кардиологии ФГБНУ “Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук” (г. Томск) от 20.12.2016 г. (№ 150).

Ультразвуковое исследование сердца выполнено на системе Vivid E95 (GE Healthcare, США) с использованием матричного датчика M5S (1,5–4,6 МГц) по стандартной методике. Конечный систолический объем (КСО), конечный диастолический объем (КДО) и фракцию выброса (ФВ) ЛЖ оценивали по Simpson [19]. Измерения толщины межжелудочковой перегородки (МЖП), задней стенки ЛЖ и конечного диастолического размера ЛЖ выполняли на уровне зубца Q ЭКГ для вычисления массы миокарда (ММ) ЛЖ [19]. Из апикальной четырехкамерной позиции проводили измерения длинника и поперечника ЛЖ в конце диастолы и систолы для расчета индекса сферичности ЛЖ. Все полученные показате-

тели индексировались на площадь поверхности тела ребенка [19].

В импульсно-волновом доплерографическом режиме по спектру трансмитрального диастолического потока определяли значения максимальной скорости пика E , а в импульсно-волновом режиме тканевой доплерографии оценивали скорость движения латеральной части фиброзного кольца митрального клапана в период ранней диастолы (e') с последующим расчетом отношения E/e' [19].

Скручивание ЛЖ определяли в офлайн-режиме с использованием спекл-трекинг эхокардиографии как разность значений ротации ЛЖ на уровне базальных и апикальных сегментов. Также была оценена ротация ЛЖ на уровне папиллярных мышц. В зависимости от направления вращения базальных, верхушечных сегментов и на уровне папиллярных мышц ранее нами было выделено четыре типа скручивания ЛЖ (рис. 1) [18].

К группе с первым типом скручивания ЛЖ (см. рис. 1) относятся дети, имевшие направление движения базальных сегментов и на уровне папиллярных мышц по часовой стрелке, а верхушечных сегментов – против часовой стрелки. Соответственно, кривые ротации ЛЖ на уровне базальных сегментов и папиллярных мышц направлены ниже изолинии (отрицательные значения ротации), а кривые ротации верхушечных сегментов – выше изолинии (положительные значения ротации). Скручивание, соответственно, имело положительное значение. Поскольку данный тип скручивания ЛЖ регистрируется у здоровых взрослых лиц, то данный тип скручивания ЛЖ был назван нами взрослым [18].

Для второго типа скручивания, названного детским (см. рис. 1), характерно однонаправленное вращение ЛЖ против часовой стрелки на уровне базальных, верхушечных сегментов и папиллярных мышц. Кривые ротации ЛЖ были положительными на уровне всех трех отделов, а значения скручивания – отрицательными [18].

При третьем типе скручивания (вариант детского типа) (см. рис. 1), в отличие от второго, вращение ЛЖ на уровне папиллярных мышц направлено по часовой стрелке, кривые ротации на уровне папиллярных мышц отрицательные [18].

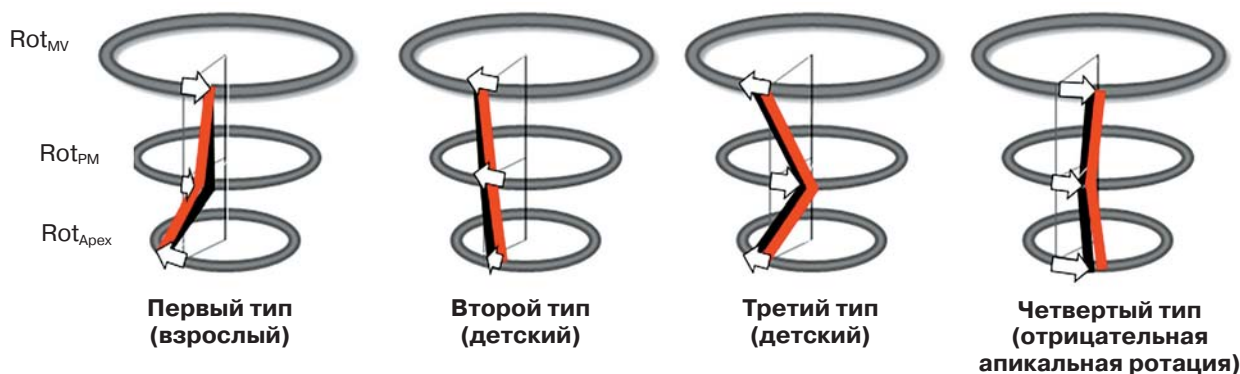


Рис. 1. Типы скручивания ЛЖ у детей, рожденных глубоконедоношенными с ОНМТ и ЭНМТ, и у здоровых детей, рожденных доношенными. Направление вращения ЛЖ на уровне базальных сегментов и папиллярных мышц: красная линия – у глубоконедоношенных детей, черная линия – у здоровых детей, рожденных доношенными. Рисунок из статьи [18]. Rot_{MV} – ротация ЛЖ на уровне базальных сегментов, Rot_{PM} – ротация ЛЖ на уровне папиллярных мышц, Rot_{Apex} – ротация ЛЖ на уровне верхушечных сегментов.

Четвертый тип скручивания (реверсивный, или отрицательная апикальная ротация) (см. рис. 1) характеризуется направлением вращения верхушки в систолу по часовой стрелке. Следовательно, кривые апикальной ротации отрицательные. Вращение ЛЖ на уровне базальных сегментов может быть направленно как по часовой стрелке, так и против часовой стрелки [18].

Анализ диастолического вихревого потока выполнен с использованием технологии *BSI*, в основе которой лежит информация о направлении вектора скорости в течение сердечного цикла и оценке движения спеклов крови [1, 4]. Первоначально доплеровский спектр потока располагали над серошкальным изображением полости левого предсердия и ЛЖ из апикальной позиции по длинной оси так, чтобы весь поток в пределах ЛЖ визуализировался во время сердечного цикла при частоте кадров более 200/с. Полученные изображения регистрировали в количестве двух сердечных циклов и сохраняли в автоматическом режиме. Затем режим *BSI* активировали, и клипы с наиболее четко определенным непрерывным паттерном внутрисердечного потока были замедлены до 10% реального времени для проведения качественного анализа движения внутрисердечного потока в течение сердечного цикла.

Описательная статистика представлена с помощью программы Statistica (версия 12). Для проверки согласия с нормальным зако-

ном распределения использованы критерии Лиллиефорса (Lilliefors) и Шапиро–Уилка (Shapiro–Wilk), по результатам гипотеза о гауссовском распределении была отвергнута. Количественные параметры представлены в виде медианы, верхнего и нижнего квартилей (25–75-го процентилей), минимального и максимального значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый тип скручивания (взрослый) отмечался у 11 из 25 (44%) детей, второй (детский) – у 4 (16%), третий (вариант детского) – у 4 (16%), четвертый (реверсивный) – у 6 (24%). Показатели стандартной эхокардиографии в зависимости от типа скручивания ЛЖ приведены в таблице.

Качественный анализ вихревого потока в полости ЛЖ в зависимости от направления движения базальных, верхушечных сегментов и папиллярных мышц (четырёх типов скручивания) выявил следующие варианты. Первый (взрослый) тип скручивания ЛЖ у всех 11 детей в конце диастолы характеризуется регулярным мощным (структурированным, доминирующим) потоком с диастолическим вихрем по направлению к верхушке; диастолический кровоток направлен вдоль задней стенки ЛЖ, далее поток крови движется по МЖП в сторону аорты (рис. 2а). В фазу изометрического сокращения при первом типе скручивания ЛЖ наблюдался кровоток, состоя-

Таблица. Показатели стандартной эхокардиографии у детей раннего и дошкольного возраста, рожденных преждевременно, в зависимости от типа скручивания ЛЖ

Показатели	Типы скручивания ЛЖ	Медиана	25–75-й проценти	Минимальное – максимальное значения
Возраст, годы	Взрослый (первый) (n = 11)	4,0	2,9–5,0	1,0–5,0
	Детский (второй и третий) (n = 8)	2,0	2,0–3,0	2,0–4,0
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	4,5	4,0–5,0	3,0–5,0
Масса тела при рождении, г	Взрослый (первый) (n = 11)	1145,0	980,0–1200,0	810,0–1340,0
	Детский (второй и третий) (n = 8)	1100,0	930,0–1300,0	780,0–1930,0
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	1200,0	890,0–1300,0	710,0–1450,0
Рост при рождении, см	Взрослый (первый) (n = 11)	36,0	35,0–38,0	34,0–39,0
	Детский (второй и третий) (n = 8)	35,0	35,0–38,0	34,0–39,0
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	36,0	35,0–38,0	35,0–41,0
Масса тела на момент исследования, кг	Взрослый (первый) (n = 11)	15,0	14,0–17,5	10,0–23,0
	Детский (второй и третий) (n = 8)	11,8	11,0–13,0	11,0–18,0
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	15,0	13,0–18,0	11,0–21,0
Рост на момент исследования, см	Взрослый (первый) (n = 11)	108,3	94,0–116,0	77,0–122,0
	Детский (второй и третий) (n = 8)	92,5	87,0–98,0	86,0–106,0
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	106,5	97,0–112,0	91,0–114,0
ЧСС на момент исследования, уд/мин	Взрослый (первый) (n = 11)	95,0	88,0–107,0	87,0–117,0
	Детский (второй и третий) (n = 8)	106,0	88,0–113,0	88,0–113,0
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	99,0	91,0–111,0	91,0–111,0
КДО/S, мл/м ²	Взрослый (первый) (n = 11)	43,403	39,215–56,569	32,414–58,119
	Детский (второй и третий) (n = 8)	46,160	41,622–53,888	37,475–61,224
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	53,803	52,620–57,657	51,724–61,224
КСО/S, мл/м ²	Взрослый (первый) (n = 11)	10,417	8,872–12,605	5,182–17,493
	Детский (второй и третий) (n = 8)	14,266	11,465–16,969	11,095–17,241
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	16,022	15,261–18,721	13,677–21,407
ФВ ЛЖ, %	Взрослый (первый) (n = 11)	75,5	68,0–78,0	67,0–91,0
	Детский (второй и третий) (n = 8)	70,5	66,0–73,0	63,0–76,0
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	71,0	64,0–73,5	60,0–74,0
ММ ЛЖ, г/м ²	Взрослый (первый) (n = 11)	40,519	37,608–48,115	32,748–49,572
	Детский (второй и третий) (n = 8)	51,282	51,000–52,000	44,382–55,172
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	44,494	39,264–49,087	35,714–52,000
Индекс сферичности ЛЖ в диастолу	Взрослый (первый) (n = 11)	0,578	0,558–0,609	0,530–0,610
	Детский (второй и третий) (n = 8)	0,519	0,510–0,557	0,500–0,673
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	0,561	0,540–0,561	0,535–0,589
Индекс сферичности ЛЖ в систолу	Взрослый (первый) (n = 11)	0,548	0,504–0,613	0,500–0,700
	Детский (второй и третий) (n = 8)	0,568	0,524–0,602	0,500–0,617
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	0,513	0,506–0,559	0,500–0,605

Таблица (окончание).

Показатели	Типы скручивания ЛЖ	Медиана	25–75-й проценти	Минимальное – максимальное значения
Т МЖП/S, мм/м ²	Взрослый (первый) (n = 11)	5,602	4,678–6,726	4,230–6,944
	Детский (второй и третий) (n = 8)	7,158	6,222–7,655	5,547–7,889
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	5,554	4,486–5,830	3,694–6,116
Т ЗС ЛЖ/S, мм/м ²	Взрослый (первый) (n = 11)	5,848	5,605–6,726	5,128–6,944
	Детский (второй и третий) (n = 8)	7,655	6,485–8,255	5,547–8,620
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	6,137	5,974–6,377	4,559–6,596
Е/е'	Взрослый (первый) (n = 11)	5,450	4,818–7,000	2,750–8,181
	Детский (второй и третий) (n = 8)	5,940	5,196–6,691	4,761–7,133
	Реверсивный (четвертый) (n = 6)	5,816	4,820–7,956	4,818–9,333

Обозначения: ЧСС – частота сердечных сокращений, S – площадь поверхности тела, Т – толщина, ЗС – задняя стенка.

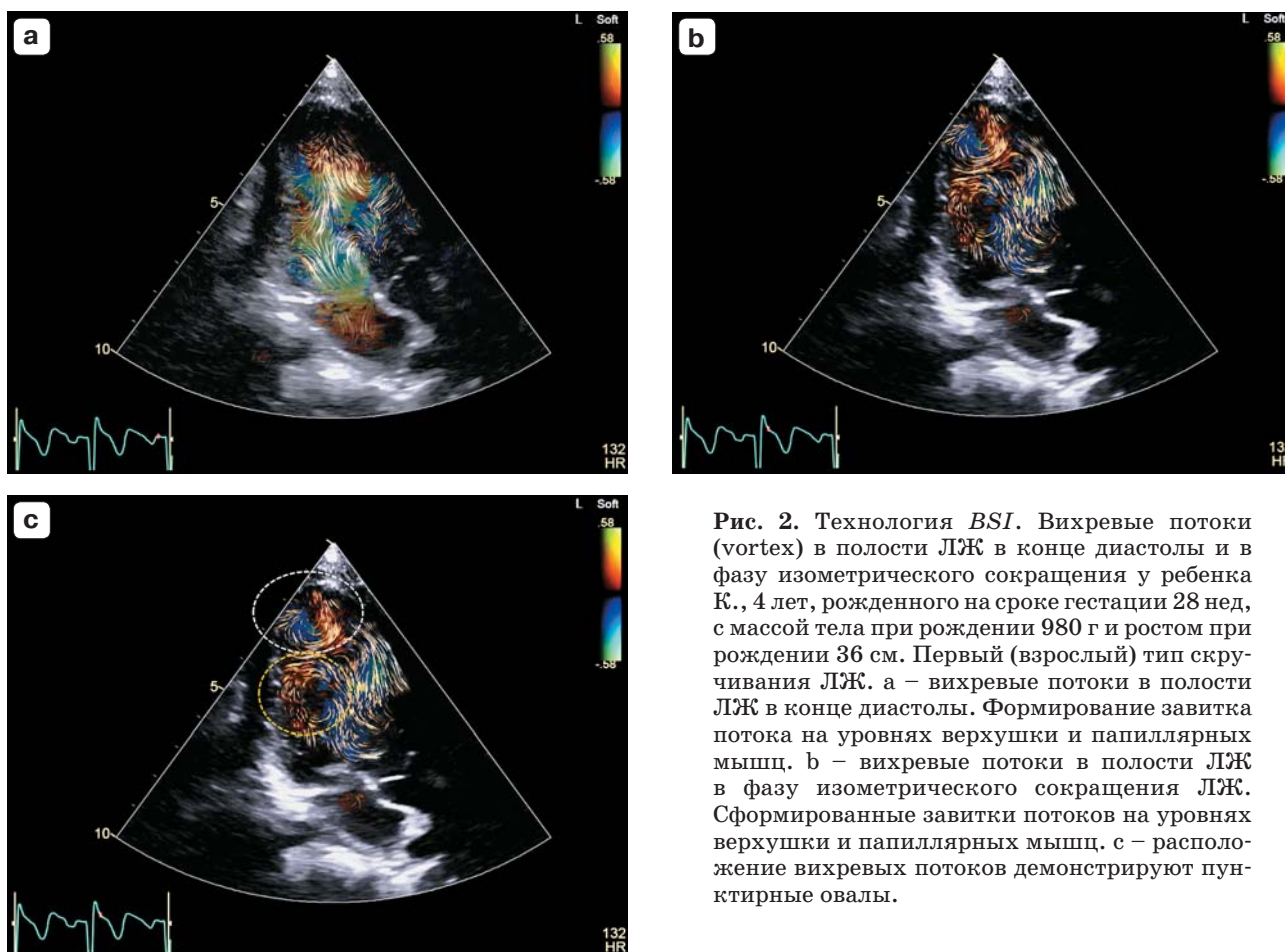


Рис. 2. Технология BSI. Вихревые потоки (vortex) в полости ЛЖ в конце диастолы и в фазу изометрического сокращения у ребенка К., 4 лет, рожденного на сроке гестации 28 нед, с массой тела при рождении 980 г и ростом при рождении 36 см. Первый (взрослый) тип скручивания ЛЖ. а – вихревые потоки в полости ЛЖ в конце диастолы. Формирование завитка потока на уровнях верхушки и папиллярных мышц. б – вихревые потоки в полости ЛЖ в фазу изометрического сокращения ЛЖ. Сформированные завитки потоков на уровнях верхушки и папиллярных мышц. с – расположение вихревых потоков демонстрируют пунктирные овалы.

щий из двух вихревых потоков, один из которых формировался на уровне верхушки, другой – на уровне папиллярных мышц (рис. 2b, 2c).

При втором и третьем (детских) типах скручивания ЛЖ у всех 8 (4 + 4) детей в конце диастолы (рис. 3a, 4a) вихревой поток регулярный, мощный (структурированный, доминирующий) с диастолическим вихрем в сторону верхушечного сегмента МЖП, где делает поворот по направлению к задней стенке ЛЖ до уровня заднедиагональной папиллярной мышцы и затем движется по направлению к аорте.

В фазу изометрического сокращения при втором типе скручивания у всех 4 детей вихревой поток характеризовался направлением от задней стенки в сторону МЖП, второй поток на уровне папиллярных мышц отсутствовал (рис. 3b, 3c). При третьем типе скручивания ЛЖ у всех 4 детей в фазу изометрического сокращения доми-

нирующий вихрь формировался на уровне папиллярных мышц по направлению к МЖП, затем перемещался к верхушке, где образовывал завиток на стороне задней стенки ЛЖ на уровне верхушечных сегментов (рис. 4b, 4c).

При четвертом (реверсивном) типе скручивания ЛЖ у всех 6 детей в конце диастолы наблюдался рассыпной вихревой поток (по типу салюта) без выделения доминирующего вихря (рис. 5a), а в фазу изометрического сокращения регистрировался один вихревой поток, захватывающий уровни верхушки, папиллярных мышц и частично базальных сегментов (рис. 5b).

На рис. 6 у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ, описаны различные варианты турбулентных вихревых потоков в конце диастолы и в фазу изометрического сокращения, а также возможные механизмы их формирования.

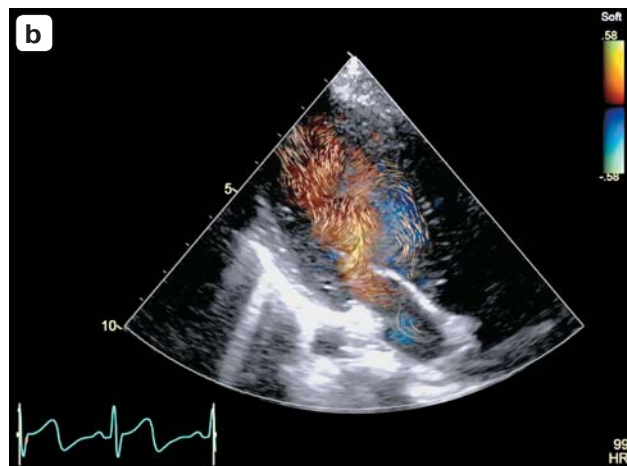
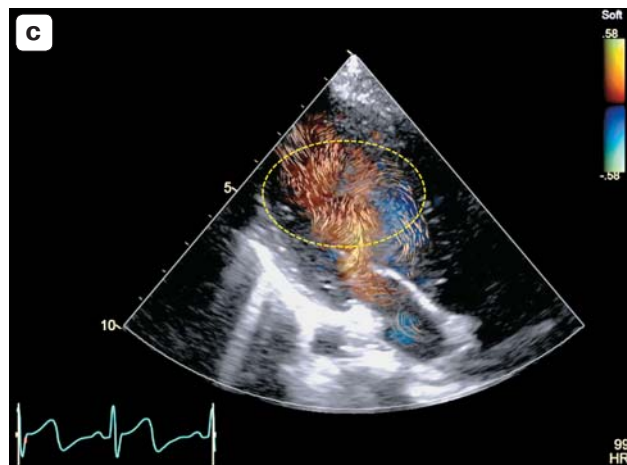
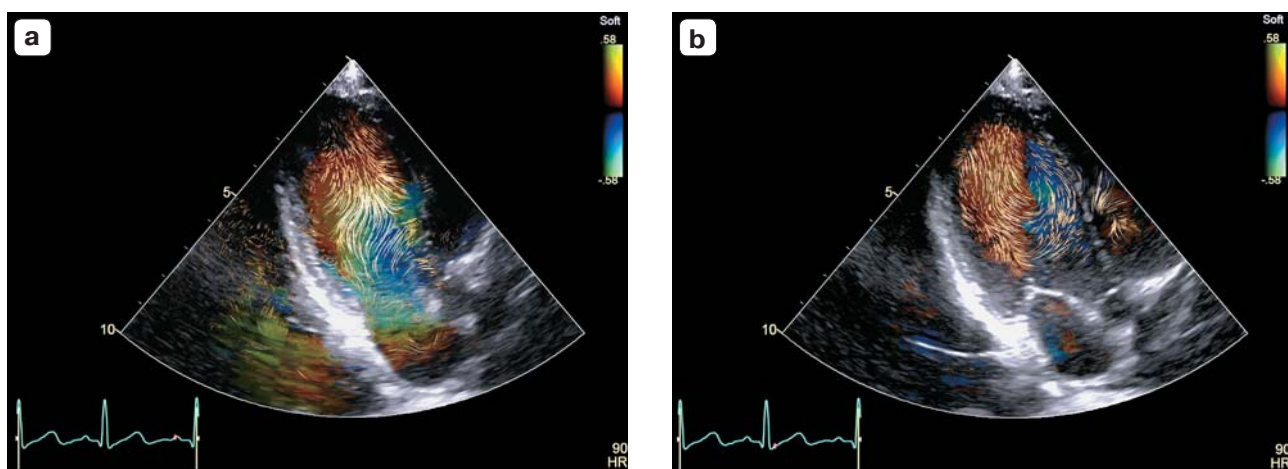
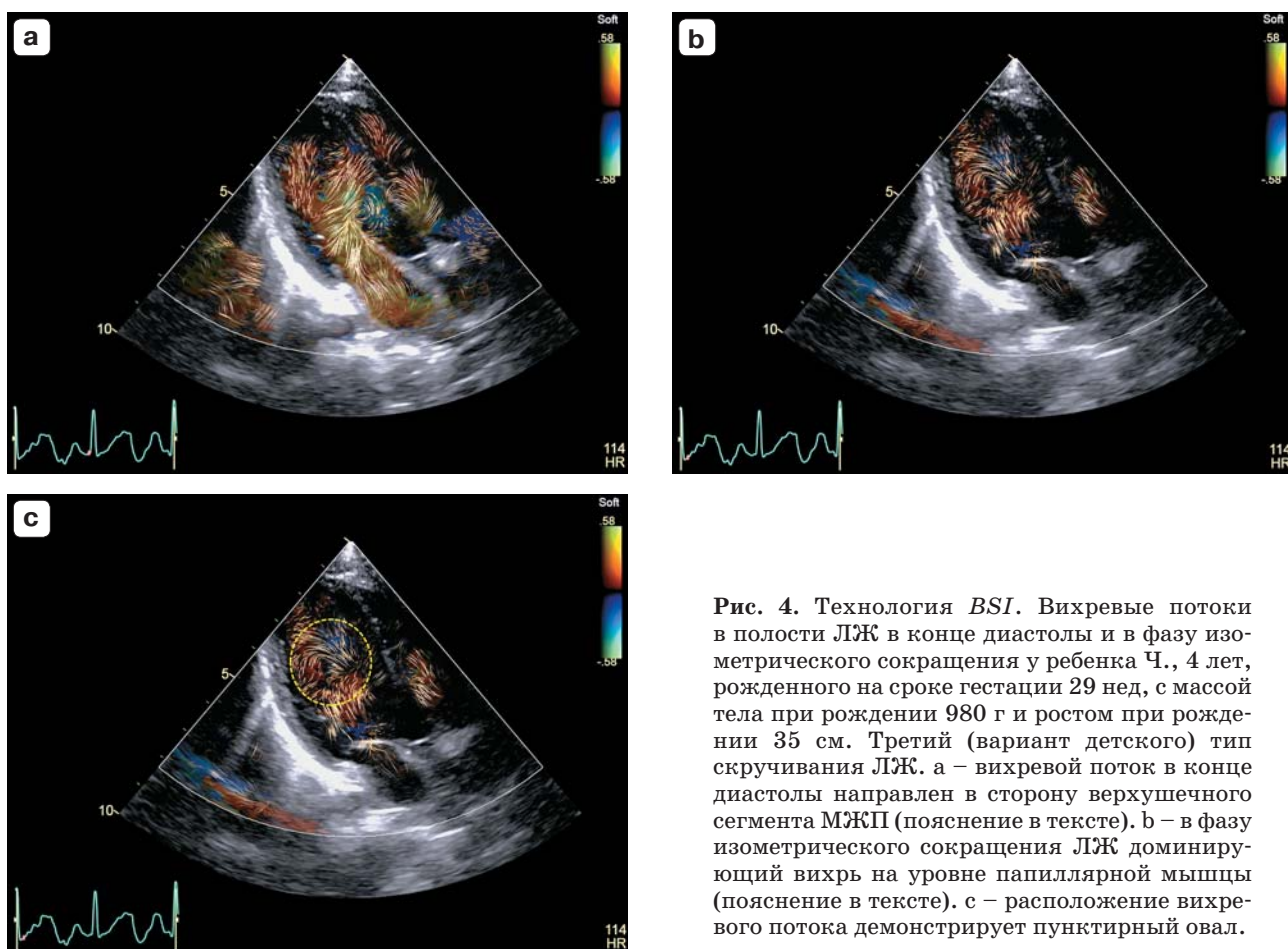


Рис. 3. Технология BSI. Вихревые потоки в полости ЛЖ в конце диастолы и в фазу изометрического сокращения у ребенка Г., 4 лет, рожденного на сроке гестации 34 нед, с массой тела при рождении 1930 г и ростом при рождении 36 см. Второй (детский) тип скручивания ЛЖ. а – вихревой поток в конце диастолы направлен в сторону верхушечного сегмента МЖП (пояснение в тексте). б – вихревой поток в полости ЛЖ в фазу изометрического сокращения направлен от задней стенки в сторону МЖП, отсутствует второй поток на уровне папиллярных мышц. с – расположение вихревого потока демонстрирует пунктирный овал.





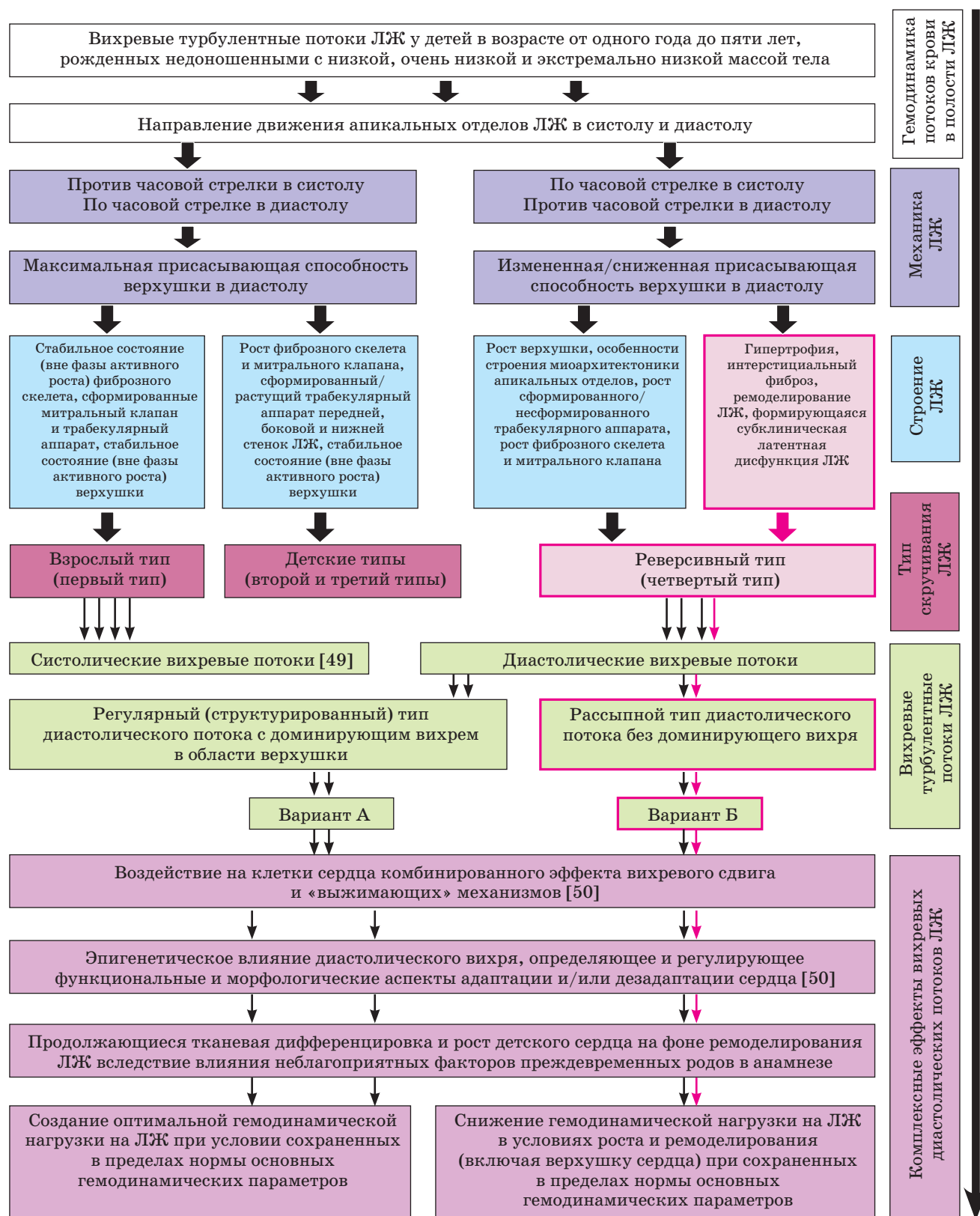


Рис. 6. Схема возможных механизмов формирования турбулентных вихревых потоков ЛЖ у детей раннего и дошкольного возраста, рожденных недоношенными, в процессе постнатального роста и продолжающейся тканевой дифференцировки сердца. Варианты диастолических вихревых потоков (гипотеза).

ОБСУЖДЕНИЕ

Сердечная мышца – сложная многоуровневая система, механическое поведение которой определяется двумя компонентами: пассивным, связанным с упругими и вязкими свойствами мышцы как композитного материала, определяющими природу деформационных процессов в миокарде, и активным, позволяющим сердцу выполнять свою основную функцию обеспечения сосудистого кровотока [20]. “Закрученный поток крови есть результат ее взаимодействия со стенками транспортных каналов, основу которого представляет волна скручивания как процесс последовательного сокращения мышечных элементов сосудов по ходу кровотока. За один цикл сердечно-сосудистой деятельности фаза расслабления миоцитов сменяется фазой их активного сокращения, вовлекая в работу все артериальное русло, начиная от миокарда желудочков сердца и заканчивая мелкими кровеносными сосудами, имеющими мышечный слой, вплоть до микроциркуляторного звена” [21].

Важным фактором, оказывающим влияние на флюидодинамические процессы в систолу и диастолу у детей, рожденных недоношенными, является рост сердца (увеличение объемов и массы левого предсердия и ЛЖ, рост и тканевая дифференцировка фиброзного скелета [22–24], усложнение спиралеобразного трабекулярного рисунка [25], повышение количества и степени ветвления трабекул, приобретение ими более ровных контуров, образование многослойных сетей, особенно в нижней трети ЛЖ, развитие сосочковых мышц [25, 26], сохранение седловидной формы фиброзного кольца митрального клапана [27–29] и асимметрия створок митрального клапана [30]). Митральный клапан в норме способствует формированию петлевой схемы кровотока в ЛЖ, отклоняет вихревой поток в диастолу в сторону боковой стенки, который затем быстро уменьшается в области, прилегающей к боковой стенке. Створки митрального клапана влияют на характер движения крови в желудочке, в частности, на уровне верхушки, усиливая апикальное “омывание” [31].

Природа формирования диастолического потока при взрослом (первом) типе скручивания ЛЖ у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными

ми с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ, по нашему мнению, предполагает нахождение практически всех структур детского сердца вне фазы активного роста (включая митральный клапан; трабекулярный аппарат, в частности передней и боковой стенок ЛЖ) и определенные особенности организации миоархитектоники.

Формирование вихревого потока при детских (втором и третьем) типах скручивания ЛЖ у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ, согласно нашему предположению, есть следствие максимально активного роста передней части фиброзного кольца митрального клапана, зоны митрально-аортального соединения, базальных сегментов и трабекулярности ЛЖ. Вне фазы активного роста находится область верхушки сердца. Возможен иной вариант объяснения – в основе формирования диастолического потока при детских типах скручивания ЛЖ лежит ряд закономерностей продолжающейся тканевой дифференцировки ЛЖ: вне фазы активного роста находятся область передней ветви фиброзного кольца митрального клапана, зона митрально-аортального соединения, трабекулярный аппарат передней, боковой стенок ЛЖ, область верхушки (полностью, включая трабекулярный аппарат); в фазе максимально активного роста – область задней части фиброзного кольца митрального клапана, трабекулярный аппарат задней стенки ЛЖ.

Механизм возникновения диастолического вихревого потока ЛЖ при четвертом (реверсивном) типе скручивания ЛЖ у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ, по нашему мнению, обусловлен особенностями организации миоархитектоники волокон апикальных сегментов, повышением количества волокон миокарда и особенностями строения трабекулярного аппарата, включая область верхушки [23, 32, 33], что хорошо согласуется с концепцией доминирующего вклада верхушки в механику вращения [34] и феномена диастолического всасывания [35, 36]. Перестроение у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ, характера диастолического потока на рассыпной тип при

вращении апикальных сегментов по часовой стрелке в систолу эволюционно целесообразно и функционально эффективно, поскольку возникает на фоне активного роста всего сердца в длину, обусловленного в том числе продолжающимся ростом и тканевой дифференцировкой области верхушки [23, 37–40], что, вероятно, позволяет снизить уровень гемодинамической нагрузки на активно растущие сегменты ЛЖ, сохраняя при этом основные гемодинамические параметры чаще в пределах возрастной нормы (даже при условии начинающегося ремоделирования у некоторых детей, рожденных недоношенными).

Необходимо отметить, что основные структурные образования ЛЖ, способствующие закручиванию потоков крови в систолу и имеющие спиралевидную ориентацию, претерпевают существенную модификацию в период пре- и постнатального онтогенеза [25, 41]. Участие трабекул и сосочковых мышц в повышении глубины проникновения митральной струи потока в апикальную область ЛЖ во время диастолы с последующим обеспечением лучшего сжатия верхушечной области в систолу, в увеличении сложности топологии вихря в диастолическом потоке сегодня считается установленным фактом [35, 42]. В целом наше представление о характере флюидодинамических процессов ЛЖ у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ, не противоречит фундаментальным научным постулатам по данному вопросу – “сокращение миокарда приводит к направленному изменению потоков крови во время сердечного цикла, сопровождаясь возникновением феномена турбулентности с очень высокими скоростями потока. Диастолический кровоток, имея вихревой характер, движется вдоль перегородки, а ядро потока превращается в компактный кольцевой вихрь, который направлен к верхушке; митральный клапан смещается, и поток крови направляется к передней стенке” [3].

В то же время известно, что потеря механизма закручивания потока приводит к перераспределению нагрузки на субэндокардиальный слой миокарда, вызывая его перенапряжение, что влечет за собой увеличение потребности миокарда в кислороде и снижает эффективность сокращения.

А появление специфических признаков вихревых потоков (хаотичная дезорганизация, периферическая диссипация), снижение скоростных параметров отчетливо характеризуют изменения направления кровотока и, в конечном счете, состояние гемодинамики и производительность сердца [3, 43, 44]. Более низкие значения глубины проникновения вихря в апикальные отделы ЛЖ, снижение апикальной ротации являются прогностически неблагоприятными событиями [34, 45]. Не менее важное влияние на становление контрактильности детского сердца, диастолические события и, следовательно, формирование вихревых турбулентных потоков в условиях недоношенности в анамнезе оказывает, на наш взгляд, утолщение стенок миокарда ЛЖ в области базальных, апикальных сегментов и на уровне папиллярных мышц, коррелирующее со сроком гестации. Природа утолщения может быть обусловлена гипертрофией кардиомиоцитов и/или развитием интерстициального фиброза [23, 46].

Следовательно, у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ, нельзя полностью исключить влияние на формирование характера диастолического вихревого потока рассыпного типа и структуру ЛЖ при движении апикальных сегментов по часовой стрелке в систолу различных неблагоприятных факторов преждевременных родов, влекущих возникновение у некоторых детей признаков формирующейся латентной субклинической дисфункции. Полученные в проведенном исследовании характеристики диастолических вихревых потоков при движении верхушки в систолу по часовой стрелке у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных с ОНМТ, ЭНМТ и НМТ, выглядят весьма логичным феноменом, подтверждая гипотезу “о формировании уникальной кардиомиопатии недоношенных” [46–48] у некоторых участников исследования, рожденных преждевременно.

Формирование рассыпного вихревого диастолического потока, сопровождающего возникновение четвертого (реверсивного) типа скручивания ЛЖ (движение верхушки по часовой стрелке в систолу и против часовой стрелки в диастолу), у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожден-

ных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ, вероятно, является следствием, с одной стороны, находящихся в фазе активного роста практически всех отделов детского сердца – области передней и задней ветвей фиброзного кольца митрального клапана, зоны митрально-аортального контакта, передней створки митрального клапана, фиброзных треугольников, трабекулярного аппарата передней, боковой и задней стенок ЛЖ и области верхушки; с другой – связано с формированием гипертрофии, интерстициального фиброза ЛЖ (включая область верхушки сердца), уменьшением конусности ЛЖ, дислокацией, изменением миоархитектоники верхушки и особенностями организации *vortex cordis* (водоворот сердца), а также remodelированием и формирующейся субклинической латентной дисфункцией ЛЖ у некоторых детей [23, 46, 47].

Таким образом, исследование потоков крови в полостях сердца дает возможность более глубокого понимания физических явлений при оценке гемодинамики и функции миокарда [3, 49]. В результате проведенного исследования предложена и обоснована гипотеза существования при различных типах вращательного движения ЛЖ в систолу у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными, вихревых турбулентных потоков в период диастолы и фазу изометрического сокращения. Описаны различные варианты диастолических вихревых потоков ЛЖ, являющихся эволюционно и функционально целесообразными механизмами, обеспечивающими целостность и этапность постнатального онтогенеза детского сердца на фоне гетерохронности созревания функциональных систем, непрерывности, неравномерности, индивидуальности темпов роста и развития камер сердца при условии наличия фактора преждевременных родов в анамнезе.

ВЫВОДЫ

1) Изучение по данным технологии BSI характера диастолических вихревых потоков ЛЖ у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с ОМТ, ОНМТ и ЭНМТ, при различных

типах скручивания ЛЖ в систолу позволяет выделить четыре варианта, основанных на анализе направления движения и организации основного (доминирующего) вихря.

2) При направлении движения верхушки в систолу против часовой стрелки при первом (взрослом) типе скручивания ЛЖ выявлен первый вариант вихревых диастолических потоков ЛЖ, характеризующийся регулярным мощным (структурированным, доминирующим) потоком с диастолическим вихрем по направлению к верхушке; диастолический кровоток направлен вдоль задней стенки ЛЖ, далее поток крови движется по МЖП в сторону аорты.

3) При втором и третьем типах скручивания ЛЖ (детские варианты) выявлен второй вариант вихревых диастолических потоков ЛЖ, характеризующийся регулярным мощным (структурированным, доминирующим) потоком с диастолическим вихрем в сторону верхушечного сегмента МЖП, где делает поворот по направлению к задней стенке ЛЖ до уровня заднемедиальной папиллярной мышцы и затем движется по направлению к аорте.

4) При четвертом (реверсивном) типе скручивания ЛЖ (направление движения апикальных отделов в систолу по часовой стрелке) выявлен третий вариант вихревых диастолических потоков ЛЖ, характеризующийся рассыпным типом диастолического вихревого потока без выделения доминирующего вихря.

5) Развитие различных вариантов вихревых диастолических потоков у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных недоношенными с НМТ, ОНМТ и ЭНМТ, является неотъемлемой частью процесса постнатального онтогенеза детского сердца при условии наличия фактора преждевременных родов в анамнезе.

Представленная публикация выполнена в рамках фундаментальной темы НИИ кардиологии Томского НИМЦ “Фундаментальные аспекты формирования структурно-функциональных изменений сердца и сосудов в разных возрастных группах на доклинической, клинической стадиях и после гемодинамической коррекции сердечно-сосудистых заболеваний”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Nyrnes S.A., Fadnes S., Wigen M.S., Mertens L., Lovstakken L. Blood speckle-tracking based on high-frame rate ultrasound imaging in pediatric cardiology. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; 33 (4): 493–503.e5. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2019.11.003>
- Pedrizetti G., Martiniello A.R., Bianchi V., D'Onofrio A., Caso P., Tonti G. Cardiac fluid dynamics anticipates heart adaptation. *J. Biomech.* 2015; 48 (2): 388–391. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.11.049>
- Сандриков В.А., Дземешкевич С.Л., Кулагина Т.Ю., Ятченко А.Н., Ван Е.Ю. Неинвазивная регистрация турбулентных потоков в левом желудочке. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова.* 2013; 2: 45–48.
- De Waal K., Phad N., Collins N., Boyle A. Cardiac remodeling in preterm infants with prolonged exposure to a patent ductus arteriosus. *Congenit. Heart Dis.* 2017; 12 (3): 364–372.
- Arvidsson P.M., Kovacs S.J., Toger J., Borgquist R., Heiberg E., Carlsson M., Arheden H. Vortex ring behavior provides the epigenetic blueprint for the human heart. *Sci. Rep.* 2016; 6: 22021. <https://doi.org/10.1038/srep22021>
- Bermejo J., Benito Y., Alhama M., Yotti R., Martinez-Legazpi P., Del Villar C.P., Perez-David E., Gonzalez-Mansilla A., Santa-Marta C., Barrio A., Fernandez-Aviles F., Del Alamo J.C. Intraventricular vortex properties in nonischemic dilated cardiomyopathy. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2014; 306 (5): H718–H729. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00697.2013>
- Abe H., Caracciolo G., Kheradvar A., Pedrizetti G., Khandheria B.K., Narula J., Sengupta P.P. Contrast echocardiography for assessing left ventricular vortex strength in heart failure: a prospective cohort study. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2013; 14 (11): 1049–1060. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jet049>
- Сандриков В.А., Кулагина Т.Ю., Крылов А.С., Ятченко А.М. Потоки крови в левом желудочке как предикторы дисфункции миокарда у больных дилатационной кардиомиопатией. *Российский кардиологический журнал.* 2014; 5: 7–12. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2014-5-7-12>
- Matsuura K., Shiraishi K., Sato K., Shimada K., Goya S., Uemura A., Ifuku M., Iso T., Takahashi K., Tanaka R. Left ventricular vortex and intraventricular pressure difference in dogs under various loading conditions. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2019; 316 (4): H882–H888. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00686.2018>
- Carr H., Cnattingius S., Granath F., Ludvigsson J.F., Edstedt Bonamy A.K. Preterm birth and risk of heart failure up to early adulthood. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2017; 69 (21): 2634–2642. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.03.572>
- Dabiri J.O., Gharib M. The role of optimal vortex formation in biological fluid transport. *Proc. Biol. Sci.* 2005; 272 (1572): 1557–1560. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3109>
- Gharib M., Rambod E., Kheradvar A., Sahn D.J., Dabiri J.O. Optimal vortex formation as an index of cardiac health. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2006; 103 (16): 6305–6308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0600520103>
- Stugaard M., Koriyama H., Katsuki K., Masuda K., Asanuma T., Takeda Y., Sakata Y., Itatani K., Nakatani S. Energy loss in the left ventricle obtained by vector flow mapping as a new quantitative measure of severity of aortic regurgitation: a combined experimental and clinical study. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2015; 16 (7): 723–730. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jev035>
- Schafer M., Humphries S., Stenmark K.R., Kheifets V.O., Buckner J.K., Hunter K.S., Fenster B.E. 4D-flow cardiac magnetic resonance-derived vorticity is sensitive marker of left ventricular diastolic dysfunction in patients with mild-to-moderate chronic obstructive pulmonary disease. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2018; 19 (4): 415–424. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jex069>
- Fadnes S., Nyrnes S.A., Torp H., Lovstakken L. Shunt flow evaluation in congenital heart disease based on two-dimensional speckle tracking. *Ultrasound Med. Biol.* 2014; 40 (10): 2379–2391. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2014.03.029>
- Fadnes S., Wigen M.S., Nyrnes S.A., Lovstakken L. In vivo intracardiac vector flow imaging using phased array transducers for pediatric cardiology. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2017; 64 (9): 1318–1326. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2017.2689799>
- Павлюкова Е.Н., Колосова М.В., Унашева А.И., Карпов Р.С. Ротация и скручивание левого желудочка у здоровых детей и подростков, рожденных доношенными. *Ультразвуковая и функциональная диагностика.* 2017; 1: 39–53.
- Павлюкова Е.Н., Колосова М.В., Неклюдова Г.В., Карпов Р.С. Механика левого желудочка у детей в возрасте от одного года до пяти лет, рожденных с очень низкой и экстремально низкой массой тела. *Ультразвуковая и функциональная диагностика.* 2020; 3: 74–90. <https://doi.org/10.24835/1607-0771-2020-3-74-90>
- Lang R.M., Badano L.P., Mor-Avi V., Afilalo J., Armstrong A., Ernande L., Flachskampf F.A., Foster E., Goldstein S.A., Kuznetsova T., Lancellotti P., Muraru D., Picard M.H., Rietzschel E.R., Rudski L., Spencer K.T., Tsang W., Voigt J.U. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2015; 16 (3): 233–270. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jev014>
- Sommer G., Schriefl A.J., Andra M., Sacherer M., Viertler C., Wolinski H., Holzapfel G.A. Biomechanical properties and microstructure of human ventricular myocardium. *Acta Biomater.* 2015; 24: 172–192. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2015.06.031>
- Бараев С.Н., Захаров В.Н., Орлов В.А. О необходимости винтового движения крови. *Российский журнал биомеханики.* 2002; 6 (4): 30–51.

22. Михайлов С.Б. *Клиническая анатомия сердца*. М.: Медицина, 1987. 288 с.
23. Cox D.J., Bai W., Price A.N., Edwards A.D., Rueckert D., Groves A.M. Ventricular remodeling in preterm infants: computational cardiac magnetic resonance atlas shows significant early remodeling of the left ventricle. *Pediatr. Res.* 2019; 85 (6): 807–815. <https://doi.org/10.1038/s41390-018-0171-0>
24. Kulkarni A., Morisawa D., Gonzalez D., Kheradvar A. Age-related changes in diastolic function in children: Echocardiographic association with vortex formation time. *Echocardiography*. 2019; 36 (10): 1869–1875. <https://doi.org/10.1111/echo.14479>
25. Моталин С.Б. *Формирование системы обеспечения закрученных потоков крови на этапах онтогенеза*: Дис. ... докт. мед. наук. Астрахань: Астраханская государственная медицинская академия, 2005.
26. Ромбальская А.Р. К вопросу о строении мясистых трабекул сердца человека. *Медицинский журнал*. 2008; 4: 117–120.
27. Jolley M.A., Ghelani S.J., Adar A., Harrild D.M. Three-dimensional mitral valve morphology and age-related trends in children and young adults with structurally normal hearts using transthoracic echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2017; 30 (6): 561–571. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2017.01.018>
28. Jolley M.A., Hammer P.E., Ghelani S.J., Adar A., Sleeper L.A., Lacro R.V., Marx G.R., Nathan M., Harrild D.M. Three-dimensional mitral valve morphology in children and young adults with Marfan syndrome. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2018; 31 (11): 1168–1177.e1. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2018.06.009>
29. Saremi F., Sanchez-Quintana D., Mori S., Muresian H., Spicer D.E., Hassani C., Anderson R.H. Fibrous skeleton of the heart: anatomic overview and evaluation of pathologic conditions with CT and MR imaging. *Radiographics*. 2017; 37 (5): 1330–1351. <https://doi.org/10.1148/rg.2017170004>
30. Oliveira D., Srinivasan J., Espino D., Buchan K., Dawson D., Shepherd D. Geometric description for the anatomy of the mitral valve: A review. *J. Anat.* 2020; 237 (2): 209–224. <https://doi.org/10.1111/joa.13196>
31. Seo J.H., Vedula V., Abraham T., Lardo A., Dawoud F., Luo H., Mittal R. Effect of the mitral valve on diastolic flow patterns. *Phys. Fluids*. 2014; 26(12):121901. <https://doi.org/10.1063/1.4904094>
32. Smerup M., Nielsen E., Agger P., Frandsen J., Vestergaard-Poulsen P., Andersen J., Nyengaard J., Pedersen M., Ringgaard S., Hjortdal V., Lunkenheimer P.P., Anderson R.H. The three-dimensional arrangement of the myocytes aggregated together within the mammalian ventricular myocardium. *Anat. Rec. (Hoboken)*. 2009; 292 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1002/ar.20798>
33. Sanchez-Quintana D., Garcia-Martinez V., Climent V., Hurlé J.M. Morphological changes in the normal pattern of ventricular myoarchitecture in the developing human heart. *Anat. Rec.* 1995; 243 (4): 483–495. <https://doi.org/10.1002/ar.1092430411>
34. Przewlocka-Kosmala M., Marwick T.H., Yang H., Wright L., Negishi K., Kosmala W. Association of reduced apical untwisting with incident HF in asymptomatic patients with HF risk factors. *JACC Cardiovasc. Imaging*. 2020; 13 (1 Pt 2): 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2019.01.035>
35. Steine K., Stugaard M., Smiseth O.A. Mechanisms of retarded apical filling in acute ischemic left ventricular failure. *Circulation*. 1999; 99 (15): 2048–2054. <https://doi.org/10.1161/01.cir.99.15.2048>
36. Notomi Y., Popovic Z.B., Yamada H., Wallick D.W., Martin M.G., Oryszak S.J., Shiota T., Greenberg N.L., Thomas J.D. Ventricular untwisting: a temporal link between left ventricular relaxation and suction. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2008; 294 (1): H505–H513. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00975.2007>
37. Porter G.A. Jr., Hom J., Hoffman D., Quintanilla R., de Mesy Bentley K., Sheu S.S. Bioenergetics, mitochondria, and cardiac myocyte differentiation. *Prog. Pediatr. Cardiol.* 2011; 31 (2): 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.ppedcard.2011.02.002>
38. Popescu L.M., Curici A., Wang E., Zhang H., Hu S., Gherghiceanu M. Telocytes and putative stem cells in ageing human heart. *J. Cell Mol. Med.* 2015; 19(1): 31–45. <https://doi.org/10.1111/jcmm.12509>
39. Yang X., Pabon L., Murry C.E. Engineering adolescence: maturation of human pluripotent stem cell-derived cardiomyocytes. *Circ. Res.* 2014; 114 (3): 511–523. <https://doi.org/10.1161/circresaha.114.300558>
40. Vreeker A., van Stuijvenberg L., Hund T.J., Mohler P.J., Nikkels P.G., van Veen T.A. Assembly of the cardiac intercalated disk during pre- and postnatal development of the human heart. *PLoS One*. 2014; 9 (4): e94722. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094722>
41. Boselli F., Freund J.B., Vermot J. Blood flow mechanics in cardiovascular development. *Cell. Mol. Life Sci.* 2015; 72 (13): 2545–2559. <https://doi.org/10.1007/s00018-015-1885-3>
42. Vedula V., Seo J.H., Lardo A.C., Mittal R. Effect of trabeculae and papillary muscles on the hemodynamics of the left ventricle. *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 2016; 30 (1): 3–21. <https://doi.org/10.1007/s00162-015-0349-6>
43. Kheradvar A., Assadi R., Falahatpisheh A., Sengupta P.P. Assessment of transmitral vortex formation in patients with diastolic dysfunction. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2012; 25 (2): 220–227. doi.org/10.1016/j.echo.2011.10.003
44. Charonko J.J., Kumar R., Stewart K., Little W.C., Vlachos P.P. Vortices formed on the mitral valve tips aid normal left ventricular filling. *Ann. Biomed. Eng.* 2013; 41 (5): 1049–1061. <https://doi.org/10.1007/s10439-013-0755-0>
45. Kheradvar A., Rickers C., Morisawa D., Kim M., Hong G.R., Pedrizzetti G. Diagnostic and prognostic significance of cardiovascular vortex formation. *J. Cardiol.* 2019; 74 (5): 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.jjcc.2019.05.005>

46. Lewandowski A.J. The preterm heart: a unique cardiomyopathy? *Pediatr. Res.* 2019; 85 (6): 738–739. <https://doi.org/10.1038/s41390-019-0301-3>
 47. Lewandowski A.J., Augustine D., Lamata P., Davis E.F., Lazdam M., Francis J., McCormick K., Wilkinson A.R., Singhal A., Lucas A., Smith N.P., Neubauer S., Leeson P. Preterm heart in adult life: cardiovascular magnetic resonance reveals distinct differences in left ventricular mass, geometry, and function. *Circulation.* 2013; 127 (2): 197–206. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.112.126920>
 48. Burchert H., Lewandowski A.J. Preterm birth is a novel, independent risk factor for altered cardiac remodeling and early heart failure: is it time for a new cardiomyopathy? *Curr. Treat. Options Cardiovasc. Med.* 2019; 21 (2): 8. <https://doi.org/10.1007/s11936-019-0712-9>
 49. Daae A.S., Wigen M.S., Fadnes S., Lovstakken L., Stoylen A. Intraventricular vector flow imaging with blood speckle tracking in adults: feasibility, normal physiology and mechanisms in healthy volunteers. *Ultrasound Med. Biol.* 2021; 47 (12): 3501–3513. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2021.08.021>
 50. Pasipoularides A. Mechanotransduction mechanisms for intraventricular diastolic vortex forces and myocardial deformations: part 1. *J. Cardiovasc. Transl. Res.* 2015; 8 (1): 76–87. <https://doi.org/10.1007/s12265-015-9611-y>
- ## REFERENCES
1. Nyrnes S.A., Fadnes S., Wigen M.S., Mertens L., Lovstakken L. Blood speckle-tracking based on high-frame rate ultrasound imaging in pediatric cardiology. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; 33 (4): 493–503.e5. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2019.11.003>
 2. Pedrizzetti G., Martiniello A.R., Bianchi V., D'Onofrio A., Caso P., Tonti G. Cardiac fluid dynamics anticipates heart adaptation. *J. Biomech.* 2015; 48 (2): 388–391. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.11.049>
 3. Sandrikov V.A., Dzemeshkevich S.L., Kulagina T.I., Iatchenko A.N., Van E.Yu. Noninvasive registration of turbulent flows in the left ventricle. *Pirogov Russian Journal of Surgery.* 2013; 2: 45–48. (in Russian)
 4. De Waal K., Phad N., Collins N., Boyle A. Cardiac remodeling in preterm infants with prolonged exposure to a patent ductus arteriosus. *Congenit. Heart Dis.* 2017; 12 (3): 364–372.
 5. Arvidsson P.M., Kovacs S.J., Toger J., Borgquist R., Heiberg E., Carlsson M., Arheden H. Vortex ring behavior provides the epigenetic blueprint for the human heart. *Sci. Rep.* 2016; 6: 22021. <https://doi.org/10.1038/srep22021>
 6. Bermejo J., Benito Y., Alhama M., Yotti R., Martinez-Legazpi P., Del Villar C.P., Perez-David E., Gonzalez-Mansilla A., Santa-Marta C., Barrio A., Fernandez-Aviles F., Del Alamo J.C. Intraventricular vortex properties in nonischemic dilated cardiomyopathy. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2014; 306 (5): H718–H729. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00697.2013>
 7. Abe H., Caracciolo G., Kheradvar A., Pedrizzetti G., Khandheria B.K., Narula J., Sengupta P.P. Contrast echocardiography for assessing left ventricular vortex strength in heart failure: a prospective cohort study. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2013; 14 (11): 1049–1060. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jet049>
 8. Sandrikov V.A., Kulagina T.Yu., Krylov A.S., Yatchenko A.M. The blood flows in the left ventricle as predictors for myocardial dysfunction in dilated cardiomyopathy. *Russian Journal of Cardiology.* 2014; 5: 7–12. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2014-5-7-12> (in Russian)
 9. Matsuura K., Shiraishi K., Sato K., Shimada K., Goya S., Uemura A., Ifuku M., Iso T., Takahashi K., Tanaka R. Left ventricular vortex and intraventricular pressure difference in dogs under various loading conditions. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2019; 316 (4): H882–H888. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00686.2018>
 10. Carr H., Cnattingius S., Granath F., Ludvigsson J.F., Edstedt Bonamy A.K. Preterm birth and risk of heart failure up to early adulthood. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2017; 69 (21): 2634–2642. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.03.572>
 11. Dabiri J.O., Gharib M. The role of optimal vortex formation in biological fluid transport. *Proc. Biol. Sci.* 2005; 272 (1572): 1557–1560. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3109>
 12. Gharib M., Rambod E., Kheradvar A., Sahn D.J., Dabiri J.O. Optimal vortex formation as an index of cardiac health. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2006; 103 (16): 6305–6308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0600520103>
 13. Stugaard M., Koriyama H., Katsuki K., Masuda K., Asanuma T., Takeda Y., Sakata Y., Itatani K., Nakatani S. Energy loss in the left ventricle obtained by vector flow mapping as a new quantitative measure of severity of aortic regurgitation: a combined experimental and clinical study. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2015; 16 (7): 723–730. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jev035>
 14. Schafer M., Humphries S., Stenmark K.R., Kheifets V.O., Buckner J.K., Hunter K.S., Fenster B.E. 4D-flow cardiac magnetic resonance-derived vorticity is sensitive marker of left ventricular diastolic dysfunction in patients with mild-to-moderate chronic obstructive pulmonary disease. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2018; 19 (4): 415–424. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jex069>
 15. Fadnes S., Nyrnes S.A., Torp H., Lovstakken L. Shunt flow evaluation in congenital heart disease based on two-dimensional speckle tracking. *Ultrasound Med. Biol.* 2014; 40 (10): 2379–2391. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2014.03.029>
 16. Fadnes S., Wigen M.S., Nyrnes S.A., Lovstakken L. In vivo intracardiac vector flow imaging using phased array transducers for pediatric cardiology. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2017; 64 (9): 1318–1326. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2017.2689799>

- 17 Pavlyukova E.N., Kolosova M.V., Unasheva A.I., Karpov R.S. Left ventricle rotation and twist in children and adolescents born full-term. *Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2017; 1: 39–53. (in Russian)
- 18 Pavlyukova E.N., Kolosova M.V., Neklyudova G.V., Karpov R.S. Left ventricular mechanics in children aged from one to five years old with very low and extremely low birth weight. *Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2020; 3: 74–90. <https://doi.org/10.24835/1607-0771-2020-3-74-90> (in Russian)
- 19 Lang R.M., Badano L.P., Mor-Avi V., Afilalo J., Armstrong A., Ernande L., Flachskampf F.A., Foster E., Goldstein S.A., Kuznetsova T., Lancellotti P., Muraru D., Picard M.H., Rietzschel E.R., Rudski L., Spencer K.T., Tsang W., Voigt J.U. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging*. 2015; 16 (3): 233–270. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jev014>
- 20 Sommer G., Schriebl A.J., Andra M., Sacherer M., Viertler C., Wolinski H., Holzappel G.A. Biomechanical properties and microstructure of human ventricular myocardium. *Acta Biomater.* 2015; 24: 172–192. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2015.06.031>
- 21 Bagaev S.N., Zakharov V.N., Orlov V.A. On the rationality of helical blood flow. *Russian Journal of Biomechanics*. 2002; 6 (4): 30–51. (in Russian)
- 22 Mikhaylov S.B. *Clinical anatomy of the heart*. Moscow: Medicine, 1987. 288 p. (in Russian)
- 23 Cox D.J., Bai W., Price A.N., Edwards A.D., Rueckert D., Groves A.M. Ventricular remodeling in preterm infants: computational cardiac magnetic resonance atlas shows significant early remodeling of the left ventricle. *Pediatr. Res.* 2019; 85 (6): 807–815. <https://doi.org/10.1038/s41390-018-0171-0>
- 24 Kulkarni A., Morisawa D., Gonzalez D., Kheradvar A. Age-related changes in diastolic function in children: Echocardiographic association with vortex formation time. *Echocardiography*. 2019; 36 (10): 1869–1875. <https://doi.org/10.1111/echo.14479>
- 25 Motalin S.B. *Formation of the structures of the heart at the stages of ontogeny, providing swirling of the blood flow*. PhD Thesis, Astrakhan State Medical Academy, Russia, 2005. (in Russian)
- 26 Rombalskaya A.R. To the question of the structure of the fleshy trabeculae of the human heart. *Medical Journal*. 2008; 4: 117–120. (in Russian)
- 27 Jolley M.A., Ghelani S.J., Adar A., Harrild D.M. Three-dimensional mitral valve morphology and age-related trends in children and young adults with structurally normal hearts using transthoracic echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2017; 30 (6): 561–571. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2017.01.018>
- 28 Jolley M.A., Hammer P.E., Ghelani S.J., Adar A., Sleeper L.A., Lacro R.V., Marx G.R., Nathan M., Harrild D.M. Three-dimensional mitral valve morphology in children and young adults with Marfan syndrome. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2018; 31 (11): 1168–1177.e1. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2018.06.009>
- 29 Saremi F., Sanchez-Quintana D., Mori S., Muresian H., Spicer D.E., Hassani C., Anderson R.H. Fibrous skeleton of the heart: anatomic overview and evaluation of pathologic conditions with CT and MR imaging. *Radiographics*. 2017; 37 (5): 1330–1351. <https://doi.org/10.1148/rg.2017170004>
- 30 Oliveira D., Srinivasan J., Espino D., Buchan K., Dawson D., Shepherd D. Geometric description for the anatomy of the mitral valve: A review. *J. Anat.* 2020; 237 (2): 209–224. <https://doi.org/10.1111/joa.13196>
- 31 Seo J.H., Vedula V., Abraham T., Lardo A., Dawoud F., Luo H., Mittal R. Effect of the mitral valve on diastolic flow patterns. *Phys. Fluids*. 2014; 26(12): 121901. <https://doi.org/10.1063/1.4904094>
- 32 Smerup M., Nielsen E., Agger P., Frandsen J., Vestergaard-Poulsen P., Andersen J., Nyengaard J., Pedersen M., Ringgaard S., Hjortdal V., Lunkenheimer P.P., Anderson R.H. The three-dimensional arrangement of the myocytes aggregated together within the mammalian ventricular myocardium. *Anat. Rec. (Hoboken)*. 2009; 292 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1002/ar.20798>
- 33 Sanchez-Quintana D., Garcia-Martinez V., Climent V., Hurler J.M. Morphological changes in the normal pattern of ventricular myoarchitecture in the developing human heart. *Anat. Rec.* 1995; 243 (4): 483–495. <https://doi.org/10.1002/ar.1092430411>
- 34 Przewlocka-Kosmala M., Marwick T.H., Yang H., Wright L., Negishi K., Kosmala W. Association of reduced apical untwisting with incident HF in asymptomatic patients with HF risk factors. *JACC Cardiovasc. Imaging*. 2020; 13 (1 Pt 2): 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2019.01.035>
- 35 Steine K., Stugaard M., Smiseth O.A. Mechanisms of retarded apical filling in acute ischemic left ventricular failure. *Circulation*. 1999; 99 (15): 2048–2054. <https://doi.org/10.1161/01.cir.99.15.2048>
- 36 Notomi Y., Popovic Z.B., Yamada H., Wallick D.W., Martin M.G., Oryszak S.J., Shiota T., Greenberg N.L., Thomas J.D. Ventricular untwisting: a temporal link between left ventricular relaxation and suction. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2008; 294 (1): H505–H513. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00975.2007>
- 37 Porter G.A. Jr., Hom J., Hoffman D., Quintanilla R., de Mesy Bentley K., Sheu S.S. Bioenergetics, mitochondria, and cardiac myocyte differentiation. *Prog. Pediatr. Cardiol.* 2011; 31 (2): 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.pppedcard.2011.02.002>
- 38 Popescu L.M., Curici A., Wang E., Zhang H., Hu S., Gherghiceanu M. Telocytes and putative stem cells in ageing human heart. *J. Cell Mol. Med.* 2015; 19(1): 31–45. <https://doi.org/10.1111/jcmm.12509>
- 39 Yang X., Pabon L., Murry C.E. Engineering adolescence: maturation of human pluripotent stem cell-derived cardiomyocytes. *Circ. Res.* 2014; 114 (3): 511–523. <https://doi.org/10.1161/circresaha.114.300558>

40. Vreker A., van Stuijvenberg L., Hund T.J., Mohler P.J., Nikkels P.G., van Veen T.A. Assembly of the cardiac intercalated disk during pre- and postnatal development of the human heart. *PLoS One*. 2014; 9 (4): e94722. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094722>
41. Boselli F., Freund J.B., Vermot J. Blood flow mechanics in cardiovascular development. *Cell. Mol. Life Sci*. 2015; 72 (13): 2545–2559. <https://doi.org/10.1007/s00018-015-1885-3>
42. Vedula V., Seo J.H., Lardo A.C., Mittal R. Effect of trabeculae and papillary muscles on the hemodynamics of the left ventricle. *Theor. Comput. Fluid Dyn*. 2016; 30 (1): 3–21. <https://doi.org/10.1007/s00162-015-0349-6>
43. Kheradvar A., Assadi R., Falahatpisheh A., Sengupta P.P. Assessment of transmitral vortex formation in patients with diastolic dysfunction. *J. Am. Soc. Echocardiogr*. 2012; 25 (2): 220–227. doi.org/10.1016/j.echo.2011.10.003
44. Charonko J.J., Kumar R., Stewart K., Little W.C., Vlachos P.P. Vortices formed on the mitral valve tips aid normal left ventricular filling. *Ann. Biomed. Eng*. 2013; 41 (5): 1049–1061. <https://doi.org/10.1007/s10439-013-0755-0>
45. Kheradvar A., Rickers C., Morisawa D., Kim M., Hong G.R., Pedrizzetti G. Diagnostic and prognostic significance of cardiovascular vortex formation. *J. Cardiol*. 2019; 74 (5): 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.jjcc.2019.05.005>
46. Lewandowski A.J. The preterm heart: a unique cardiomyopathy? *Pediatr. Res*. 2019; 85 (6): 738–739. <https://doi.org/10.1038/s41390-019-0301-3>
47. Lewandowski A.J., Augustine D., Lamata P., Davis E.F., Lazdam M., Francis J., McCormick K., Wilkinson A.R., Singhal A., Lucas A., Smith N.P., Neubauer S., Leeson P. Preterm heart in adult life: cardiovascular magnetic resonance reveals distinct differences in left ventricular mass, geometry, and function. *Circulation*. 2013; 127 (2): 197–206. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.112.126920>
48. Burchert H., Lewandowski A.J. Preterm birth is a novel, independent risk factor for altered cardiac remodeling and early heart failure: is it time for a new cardiomyopathy? *Curr. Treat. Options Cardiovasc. Med*. 2019; 21 (2): 8. <https://doi.org/10.1007/s11936-019-0712-9>
49. Daae A.S., Wigen M.S., Fadnes S., Lovstakken L., Stoylen A. Intraventricular vector flow imaging with blood speckle tracking in adults: feasibility, normal physiology and mechanisms in healthy volunteers. *Ultrasound Med. Biol*. 2021; 47 (12): 3501–3513. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmed-bio.2021.08.021>
50. Pasipoularides A. Mechanotransduction mechanisms for intraventricular diastolic vortex forces and myocardial deformations: part 1. *J. Cardiovasc. Transl. Res*. 2015; 8 (1): 76–87. <https://doi.org/10.1007/s12265-015-9611-y>

Vortex flows and left ventricular twist in children aged one to five years old, born prematurely with low, very low, and extremely low birth weight

E.N. Pavlyukova¹, M.V. Kolosova², G.V. Neklyudova¹, R.S. Karpov¹

¹ Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk

² Siberian State Medical University, Tomsk

E.N. Pavlyukova – M.D., Ph.D., Professor, Head of Atherosclerosis and Chronic Ischemic Heart Disease Department, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-3081-9477>

M.V. Kolosova – M.D., Ph.D., Professor, Pediatric Division, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-5550-5925>

G.V. Neklyudova – M.D., Ph.D. fellow, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-7556-9379>

R.S. Karpov – M.D., Ph.D., Professor, Academician of RAS, Scientific Director, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-7011-4316>

Correspondence to Prof. Elena N. Pavlyukova. E-mail: pavlyukovaelena@yandex.ru

Objective: to analyze the vortex flows in different types of left ventricular (LV) twist in systole in children aged from one to five years old, born prematurely with low, very low, and extremely low birth weight.

Material and methods: echocardiography was performed in 25 children aged from one to five years, born with low, very low, and extremely low body weight, with the use of Vivid E95 (GE Healthcare, USA)

on the standard protocol. Additionally, the types of LV twist were assessed with 2D speckle tracking imaging, and the flow related component (type of vortex flow at the end of diastole and in period of isometric contraction) with blood speckle imaging.

Results: the first type (adult type) of LV twist were found in 11 of 25 children (44%), the second type (children's type) – in 4 (16%), the third type (variant of children's type) – in 4 (16%), and the fourth type (reverse type or negative apical rotation) – in 6 (24%). The first type ($n = 11$) characterized by a dominant apex directional flow along the posterior wall of the LV at the end of diastole, following by movement along the interventricular septum (IVS) towards the aorta. During the period of isometric contraction, the blood flow consists of two vortex flows, one at the apex and the other at the level of the papillary muscles. In the second and third types ($n = 8$) the vortex flow at the end of diastole is directed towards the apical segment of the IVS, where it turns towards the posterior wall of the LV up to the level of the posteromedial papillary muscle, and then moves towards the aorta. During the period of isometric contraction, in the second type of LV twist ($n = 4$), the vortex flow is directed from the posterior wall towards the IVS, the second flow at the level of papillary muscles is absent. During the same period in the third type ($n = 4$), the dominant vortex flow arises at the level of the papillary muscles in the direction of the IVS, then moves toward the apex, forming a curl at the level of the apical segment of LV posterior wall. In the fourth type of LV twist ($n = 6$) there was a multidirectional vortex flow (firework-like) at the end of diastole, with no dominant vortex. In the period of isometric contraction, only one vortex flow was observed, propagating at the level of the apex, papillary muscles, and partially basal segments.

Conclusion: the arising of various types of vortex flows in children aged from one to five years, born with low, very low, and extremely low birth weight, is an integral part of the process of the child's heart post-natal ontogenesis in case preterm birth anamnesis.

Key words: 2D speckle tracking echocardiography (imaging), left ventricular rotation, left ventricular twist, vortex flow, blood speckle imaging, premature infants, children with very low birth weight, children with extremely low birth weight.

Citation: Pavlyukova E.N., Kolosova M.V., Neklyudova G.V., Karpov R.S. Vortex flows and left ventricular twist in children aged one to five years old, born prematurely with low, very low, and extremely low birth weight. *Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2021; 4: 38–56.
<https://doi.org/10.24835/1607-0771-2021-4-38-56> (in Russian)