

А.В. Макарова¹, А.А. Першин¹, Н.О. Хусаинов¹, О.С. Маслак^{1, 2}, А.Ю. Мушкин^{1, 3}¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Санкт-Петербург, Российская Федерация² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация³ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Изменение объема и пневматизации легких у подростков с идиопатическим и нейромышечным сколиозом после хирургической коррекции деформации позвоночника: ретроспективное когортное исследование

Контактная информация:

Макарова Анна Валерьевна, врач-педиатр Клиники детской хирургии и ортопедии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института фтизиопульмонологии

Адрес: 190961, Санкт-Петербург, Лиговский пр-т, д. 2–4, тел.: +7 (911) 133-38-80, e-mail: makarova_a09@mail.ru

Статья поступила: 29.01.2026, принята к печати: 16.06.2026

Обоснование. Нейромышечный сколиоз (НМС) является наиболее сложной для коррекции формой заболевания. В отличие от идиопатического сколиоза (ИС), при НМС деформация скелета сочетается с первичной слабостью межреберных мышц и диафрагмы, нарушением кашлевого клиренса и склонностью к гиповентиляции. Результаты хирургической коррекции ИС и НМС в сопоставимых по возрасту и степени деформации позвоночника группах пациентов ранее не изучали. **Цель исследования** — сравнить изменение объемных и плотностных характеристик легочной ткани у подростков с ИС и НМС в результате хирургической коррекции. **Методы.** В исследование включали данные пациентов в возрасте 13–17 лет с ИС и НМС, оперированных в 2021–2024 гг. по поводу грудного/груднопоясничного сколиоза > 40° методом задней инструментальной фиксации. Основной целевой показатель: изменение суммарного объема легких (мл). Дополнительные целевые показатели: изменение объема легких справа и слева (мл), а также доли плотностных зон паренхимы (% зон нормо-, гиповентиляции, ателектатических зон). Объем легких и величину пневматизации легочной ткани измеряли с применением КТ-волюметрии до (не ранее чем за 2 мес) и после операции (не ранее 2 нед и не позднее 3 мес). **Результаты.** Результаты хирургической коррекции деформации позвоночника изучены у 30 пациентов с ИС и 32 с НМС, сопоставимых по полу, возрасту и степени деформации позвоночника (углу Кобба). Исходный суммарный объем легких в группе НМС был ниже, чем при ИС — медиана значений показателя составила соответственно 1084 (639; 1547) и 2041 (1580; 2509) мл ($p < 0,001$). После операции у пациентов с НМС зафиксировано увеличение суммарного объема на 110 мл (95% доверительный интервал (ДИ) от 28 до 192, $p = 0,002$), в группе ИС — снижение на 266 мл (95% ДИ от –490 до –42; $p = 0,012$). При этом у пациентов с НМС увеличилась доля нормовентилируемых зон легких (справа на 16,5%, слева на 15,6%; $p < 0,001$), сократилась доля зон гиповентиляции (справа на 15,0%, слева на 9,3%; $p < 0,001$) и ателектазов (справа на 4,8%, слева на 6,9%; $p < 0,001$). В группе ИС значимых изменений в распределении плотностных зон легких не произошло, кроме уменьшения доли ателектазов слева с 5,1 до 2,3% ($p = 0,044$). **Заключение.** Хирургическая коррекция сколиоза приводит к разной динамике объемно-плотностных характеристик легких у подростков с НМС и ИС. У первых происходит увеличение суммарного объема легких, рост доли нормовентилируемых зон и уменьшение зон гиповентиляции и ателектазов, у вторых — снижение суммарного объема легких и ателектатических зон без изменения других пневматизационных показателей легких. Основные ограничения исследования — ретроспективный дизайн и анализ динамики объемно-плотностных характеристик легких в раннем послеоперационном периоде.

Ключевые слова: нейромышечный сколиоз, идиопатический сколиоз, хирургическая коррекция, компьютерная томография, волюметрия легких, подростки

Для цитирования: Макарова А.В., Першин А.А., Хусаинов Н.О., Маслак О.С., Мушкин А.Ю. Изменение объема и пневматизации легких у подростков с идиопатическим и нейромышечным сколиозом после хирургической коррекции деформации позвоночника: ретроспективное когортное исследование. Вопросы современной педиатрии. 2026;25(3):164–172. doi: <https://doi.org/10.15690/vsp.v25i3.3058>

ОБОСНОВАНИЕ

Сколиоз является одной из наиболее распространенных ортопедических патологий у детей [1, 2]. Классификация сколиозов включает идиопатический (ИС), врожденный, синдромный, нейромышечный (НМС)

и другие, более редкие, формы болезни [3]. Независимо от причин прогрессирование сколиоза в грудном и груднопоясничном отделах приводит к деформации грудной клетки в связи с изменением формы ребер [4, 5], ограничению экскурсии и неравномерному расправлению

легких [5] и, как следствие, снижению функциональных показателей легких [6, 7]. Развитие дыхательных нарушений у детей со сколиозом ассоциировано со снижением качества жизни и неблагоприятным прогнозом, в большей степени при НМС [8, 9]. Последнее обусловлено сочетанием деформации скелета с первичной слабостью межреберных мышц и диафрагмы [8, 10], нарушением кашлевого клиренса [11] и склонностью к гиповентиляции [8, 10, 12].

Ввиду особенностей основного заболевания и его осложнений НМС является еще и наиболее тяжелой для коррекции формой сколиоза ввиду особенностей основного заболевания и его осложнений [2, 12, 13]. При этом в раннем периоде после оперативной коррекции деформации позвоночника при тяжелом НМС удается добиться увеличения объема легких и зон нормовентиляции [14, 15].

В свою очередь, при идиопатическом сколиозе подростков, по результатам компьютерной томографической (КТ) волюметрии, после задней инструментальной фиксации изменения суммарного объема легких не происходит [16, 17], а по некоторым данным, отмечено снижение объема легких в среднем на 12% через 4 нед после вмешательства [18]. Еще в одном исследовании установлено, что у 18% больных послеоперационный объем легких составил менее 90% от исходного [19].

Методологически однотипное сопоставление изменений объема и пневматизации легких в результате хирургической коррекции у детей с ИС и НМС ранее не проводили. В сравнительных исследованиях изучали ортопедические исходы и осложнения оперативно-

го вмешательства [20, 21], а также качество жизни пациентов [22].

Традиционно оценка респираторного резерва у детей и подростков основана на функциональных тестах, чаще всего спирометрии и импульсной осциллометрии [23, 24]. Однако, их диагностическая ценность и воспроизводимость сомнительна у пациентов младшего возраста [24], при наличии когнитивных нарушений [13], выраженной мышечной слабости [25, 26], невозможности воспроизведения форсированных дыхательных маневров [12, 27], а также при тяжелых деформациях позвоночника [5]. Изменение спирометрических параметров — форсированной жизненной емкостью легких и объема форсированного выдоха за первую секунду — после хирургической коррекции сколиоза неоднозначно: показатели могут оставаться стабильными [28], продолжать снижаться или снижаться меньшими темпами [29], чем при естественном течении заболевания. Вместе с этим корреляция между объемом и функциональными показателями легких (в частности, общей емкостью легких) позволяет рассматривать КТ-волюметрию как дополнительный метод оценки анатомических изменений легких, не сопоставляя при этом показатели функциональных тестов с особенностями пневматизации легочной паренхимы [30]. Для оценки последних применяется КТ-волюметрия с трехмерной реконструкцией легких. Метод с высокой точностью выделяет зоны нормо-, гипо- и гипervентиляции, а также ателектазов на основании данных о структуре плотности легочной ткани [14, 15].

Anna V. Makarova¹, Andrey A. Pershin¹, Nikita O. Khusainov¹, Olga S. Maslak^{1, 2}, Alexandr Yu. Mushkin^{1, 3}

¹ St. Petersburg Research Institute of Phthysiolpulmonology, St. Petersburg, Russian Federation

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation

³ Pavlov First St. Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russian Federation

Changes in Lung Volume and Pulmonary Ventilation in Adolescents with Idiopathic and Neuromuscular Scoliosis after Surgical Correction of Spinal Deformity: Retrospective Cohort Study

Background. Neuromuscular scoliosis (NMS) is the most challenging form of the disease to correct. Unlike idiopathic scoliosis (IS), in NMS, skeletal deformity is accompanied by primary weakness of the intercostal muscles and diaphragm, impaired cough clearance, and a tendency toward hypoventilation. The outcomes of surgical correction of IS and NMS in age- and deformity severity-matched patient groups have not been previously studied. **Objective.** The aim of the study is to compare changes in volumetric and density characteristics of lung tissue in adolescents with IS and NMS after surgical correction. **Methods.** This study included data from patients aged 13–17 years with IS and NMS who underwent posterior spinal instrumentation due to thoracic/thoracolumbar scoliosis >40° between 2021 and 2024. The primary endpoint was the change in total lung volume (mL). Secondary endpoint included changes in right and left lung volumes (mL), as well as the proportion of density-defined lung parenchymal zones (% of normoventilated, hypoventilated, and atelectatic zones). Lung volume and pulmonary ventilation were assessed via CT volumetry before (no earlier than 2 months prior) and after surgery (no earlier than 2 weeks and no later than 3 months after the procedure). **Results.** The outcomes of surgical correction of spinal deformity were studied in 30 patients with IS and 32 patients with NMS matched in gender, age, and degree of spinal deformity (Cobb angle). Baseline total lung volume in the NMS group was lower than in the IS group, with median values of 1084 (639; 1547) and 2041 (1580; 2509) mL, respectively ($p < 0.001$). After surgery, patients with NMS showed an increase in total lung volume of 110 mL (95% confidence interval [CI] 28 to 192, $p = 0.002$), whereas the IS group showed a decrease of 266 mL (95% CI –490 to –42; $p = 0.012$). At the same time, the proportion of normoventilated lung zones increased (right lung by 16.5%, left lung by 15.6%; $p < 0.001$) in patients with NMS, while the proportion of hypoventilated zones decreased (right lung by 15.0%, left lung by 9.3%; $p < 0.001$), as did the proportion of atelectatic zones (right lung by 4.8%, left lung by 6.9%; $p < 0.001$). In the IS group, no significant changes in the distribution of lung density zones were observed, except for a decrease in the proportion of left-sided atelectasis from 5.1% to 2.3% ($p = 0.044$). **Conclusion.** Surgical correction of scoliosis leads to different dynamics of lung volumetric and density characteristics in adolescents with NMS and IS. There is an increase in total lung volume, an increase in the proportion of normoventilated zones, and a decrease in hypoventilated and atelectatic zones in NMS group, while in IS group there is a decrease in total lung volume and atelectatic zones without changes in other pulmonary ventilation parameters. The main limitations of the study are its retrospective design and the analysis of lung volumetric and density characteristics dynamics in early postoperative period.

Keywords: neuromuscular scoliosis, idiopathic scoliosis, surgical correction, computed tomography, lung volumetry, adolescents

For citation: Makarova Anna V., Pershin Andrey A., Khusainov Nikita O., Maslak Olga S., Mushkin Alexandr Yu. Changes in Lung Volume and Pulmonary Ventilation in Adolescents with Idiopathic and Neuromuscular Scoliosis after Surgical Correction of Spinal Deformity: Retrospective Cohort Study. *Voprosy sovremennoi pediatrii — Current Pediatrics*. 2026;25(3):164–172. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.15690/vsp.v25i3.3058>

Цель исследования

Сравнить изменение объемных и плотностных характеристик легочной ткани у подростков с ИС и НМС в результате хирургической коррекции.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Одноцентровое ретроспективное сравнительное когортное исследование.

Условия проведения исследования

В исследование включали данные пациентов, последовательно оперированных в Клинике детской хирургии и ортопедии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института фтизиопульмонологии (Санкт-Петербург) в период с января 2021 по декабрь 2024 г. При формировании выборки опирались на ранее опубликованные данные о влиянии хирургической коррекции деформации позвоночника на объем и пневматизацию легких у 5 пациентов с тяжелым НМС [14], а также на данные КТ-волюметрии 32 пациентов, использованные для динамической оценки респираторных изменений после хирургической коррекции сколиоза [15].

Критерии соответствия

Критерии включения:

- возраст пациентов 13–17 лет на момент операции;
- установленный диагноз «нейромышечный сколиоз» или «идиопатический сколиоз»;
- основная грудная или грудопоясничная дуга деформации;
- деформации позвоночника > 40°;
- проведение хирургической коррекции деформации;
- КТ органов грудной клетки, выполненная не ранее чем за 2 мес до операции и через 2 нед – 3 мес после нее;
- отсутствие признаков инфекционных заболеваний дыхательной системы (инфильтративных изменений) по данным КТ-исследования до операции.

Предоперационная и послеоперационная КТ выполнены в целях обычной клинической практики. В соответствии с регламентом лечебного учреждения, все КТ позвоночника и грудной клетки были выполнены не ранее чем за 2 мес до операции и в период от 2 нед до 3 мес после операции. Период «от 2 нед» позволяет, по нашему мнению, исключить влияние интраоперационной вентиляции на пневматизационную структуру легких, а также послеоперационного болевого синдрома — на ограничение дыхательных движений.

Критерии не включения:

- врожденные пороки развития легких, грудной клетки или позвоночника;
- миопатические и прогрессирующие нейропатические варианты нейромышечных деформаций позвоночника (например, спинальная мышечная атрофия, миопатия Дюшенна);
- хронические заболевания легких (например, бронхиальная астма, муковисцидоз, бронхолегочная дисплазия);
- хирургические вмешательства на органах грудной клетки или позвоночнике в прошлом;
- атипичные деформации позвоночника, в том числе левосторонние грудные ИС;
- артефакты пред- или послеоперационных КТ-изображений, не позволяющие корректно выполнить сегментацию легочной паренхимы;

- проведение принудительной или вспомогательной искусственной вентиляции легких (ИВЛ) на протяжении > 2 сут после операции;
- торакотомический доступ и мобилизация передней колонны позвоночника в ходе оперативного вмешательства.

Оперативное вмешательство

Все операции выполнены из открытого заднего доступа в объеме инструментальной коррекции/фиксации позвоночника с использованием транспедикулярных опорных элементов тремя хирургами-вертебрологами, каждый с опытом коррекции деформаций позвоночника ≥ 10 лет. Операции проводились с интраоперационным мониторингом вызванных моторных потенциалов.

Целевые показатели исследования

Основной показатель исследования

Сравнение результатов оперативного вмешательства в группах (ИС и НМС) выполнено по величине изменения суммарного объема легких (разница после- и предоперационных показателей, мл) — интегрального показателя рестриктивных изменений грудной полости [10, 28, 29].

Дополнительные показатели исследования

Дополнительно сравнение результатов лечения детей с ИС и НМС выполнено по разнице следующих показателей:

- изменение объема правого и левого легких в отдельности (в мл);
- изменение распределения плотностных зон легочной паренхимы (в процентах от объема каждого легкого) по категориям: нормовентиляция, гиповентиляция, ателектаз, эмфизема;
- изменение величины деформации (в % от исходного угла Кобба).

Компьютерная томография

Все КТ-исследования выполнены на 320-срезовом компьютерном томографе Aquilion ONE (Toshiba, Япония) при толщине реконструируемого среза 0,5 мм, использовании стандартного мягкотканного фильтра (FC03) и сканировании во время спонтанного дыхания без задержки. Полученные изображения обрабатывали в программе Vitrea, версия 7.x (Vital Images, США) с использованием специализированного модуля Lung Density Analysis. Алгоритм модуля автоматически проводит трехмерную сегментацию легочной паренхимы, исключая крупные сосуды и бронхи и рассчитывая объемы правого и левого легкого, а также суммарный объем легких (мл). После автоматической сегментации врач выполняет визуальный контроль корректности контурирования легких в аксиальной, коронарной и сагиттальной плоскостях. При наличии технических артефактов или ошибок сегментации, не позволяющих оценить объем легочной паренхимы, КТ-изображение исключали из анализа. На основании значений плотности в единицах Хаунсфилда (HU) программа автоматически выделяет в каждом легком зоны с различной степенью воздушности, используя следующие пороговые значения: эмфизема — < –950 HU, нормовентиляция — от –950 до –700 HU, гиповентиляция — от –700 до –500 HU, ателектаз — > –500 HU. Для каждой зоны рассчитываются ее объем (мл) и процентное отношение к общему объему соответствующего легкого.

Оценка деформации позвоночника

Величину деформации позвоночника определяли до и после операции по методике Кобба (в градусах, °) по

фронтальным рентгенограммам. У пациентов, способных к самостоятельной вертикализации, рентгенограммы выполняли в положении стоя, у невертикализуемых пациентов — в положении лежа.

Статистические процедуры

Размер выборки

Расчет необходимого размера выборки на этапе планирования исследования не проводили.

Статистические методы

Анализ данных выполнен с использованием пакета статистических программ StatTech, версия 4.7 (Статтех, Россия). Распределение количественных переменных оценивали критерием Шапиро – Уилка. Ввиду частого асимметричного распределения все показатели описаны с указанием медианы (Q_1 ; Q_3). Для сравнения двух независимых групп по количественным признакам использовали U -критерий Манна – Уитни; разницу медиан представляли с 95% доверительным интервалом (ДИ), рассчитанным по методу Ходжеса – Лемана. Внутригрупповую динамику оценивали критерием Уилкоксона. Для сравнения категориальных признаков применяли критерий χ^2 Пирсона. Различия групп считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Для каждого сравнения по количественным показателям вычисляли размер эффекта по Козну (d). Для категориальных переменных использован критерий h Козна. Размеры эффекта приведены для всех сравнений — вне зависимости от уровня значимости.

Связь количественных показателей изучали с применением корреляционного анализа с расчетом коэффициента корреляции по Спирмену (r_s).

Этическая экспертиза

Проведение ретроспективного исследования одобрено Локальным этическим комитетом Санкт-Петербургского научно-исследовательского института фтизиопульмонологии (протокол № 111 от 15.01.2025). Законные представители при поступлении ребенка в клинику подписывали информированное добровольное согласие на использование результатов обследования и лечения в научных целях. Все данные анализировали в обезличенном виде.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Формирование выборки исследования

Последовательность формирования выборки исследования представлена на рис. 1. Основными причинами не включения в каждую из групп были несоответствие критерию возраста и отсутствие данных КТ-исследований до или после оперативного вмешательства.

Характеристика сравниваемых групп

Группы больных с ИС и НМС были сопоставимы по полу и возрасту, индексу массы тела (ИМТ) и распределению случаев правосторонней грудной и грудопоясничной основной дуги. Вместе с тем, размер эффекта по Козну для показателя ИМТ был средним, что указывает на более низкие значения показателя в группе НМС (табл. 1). У 27 (84%) пациентов с НМС причиной деформации был детский церебральный паралич, в остальных случаях — спинальная травма ($n = 2$), нейрофиброматоз, тип 1 ($n = 2$) и синдром Элерса – Данло ($n = 1$).

Основной результат исследования

Исходный суммарный объем легких у пациентов с НМС был почти вдвое ниже, чем у пациентов с ИС (табл. 2).

Рис. 1. Этапы формирования выборки исследования

Fig. 1. Stages of study sampling



Примечание. ИС — идиопатический сколиоз; НМС — нейромышечный сколиоз; КТ — компьютерная томография.

Note. IS (ИС) — idiopathic scoliosis; NMS (НМС) — neuromuscular scoliosis; CT (КТ) — computed tomography.

Таблица 1. Исходная характеристика пациентов с ИС и НМС
Table 1. Baseline characteristics of patients with IS and NMS

Показатель	ИС (n = 30)	НМС (n = 32)	Размер эффекта	p
Возраст, годы	15,2 (14,2; 16,1)	14,8 (13,9; 15,9)	d = 0,18	0,319
Пол (женский), n (%)	24 (80,0 %)	22 (68,8 %)	h = 0,25	0,312
ИМТ, кг/м ²	18,2 (17,0; 20,1)	17,0 (15,8; 18,5)	d = 0,48	0,065
Тип основной дуги, n (%): • правосторонняя грудная • правосторонняя грудопоясничная	18 (60,0%) 12 (40,0%)	22 (68,8%) 10 (31,2%)	h = 0,18	0,456

Примечание. Количественные данные описаны с указанием медианы (Q₁; Q₃). Размер эффекта для количественных переменных — d Коэна, для категориальных — h Коэна (малый эффект — около 0,2, средний — 0,5, большой — 0,8).
Note. Quantitative data is presented as median (Q₁; Q₃). Effect size for quantitative variables is expressed as Cohen's d, and for categorical variables as Cohen's h (small effect — approximately 0.2, medium — 0.5, large — 0.8).

Таблица 2. Изменение суммарного объема легких после хирургической коррекции ИС и НМС у подростков
Table 2. Changes in total lung volume after surgical correction of IS and NMS in adolescents

Группа	До операции, мл	После операции, мл	Δ, мл	Разница Δ (95% ДИ), мл	p
ИС (n = 30)	2041 (1580; 2509)	1775 (1410; 2139)	–266 (–622; +18)	–376 (–562; –190)	< 0,001
НМС (n = 32)	1084 (639; 1547)	1194 (810; 1726)	+110 (–123; +343)		

Примечание. Описание исходных данных, данных после операции и изменения значений показателя выполнено с указанием медианы (Q₁; Q₃). Δ — разница («после» минус «до»). Разница Δ между группами представлена как разность медиан (ИС минус НМС) с 95% ДИ, рассчитанным по методу Ходжеса – Лемана, p-значения — с применением U-критерия Манна – Уитни. ИС — идиопатический сколиоз; НМС — нейромышечный сколиоз.
Note. Descriptive statistics for baseline data, postoperative data, and changes in the parameters are presented as median (Q₁; Q₃). Δ — difference (postoperative minus preoperative). The difference in Δ between groups is presented as the median difference (IS minus NMS) with 95% CI calculated via the Hodges – Lehmann method; p-values were calculated via the Mann – Whitney U test. IS (IS) — idiopathic scoliosis; NMS — neuromuscular scoliosis.

После операции изменение значений этого показателя в группе НМС статистически значимо отличалось от величины изменения в группе ИС, разница эффекта была значительной (d = 1,02). Медиана периода послеоперационного контроля КТ-волюметрических показателей составила для ИС 5,8 (3,5; 9,0) нед, для НМС — 5,5 (3,5; 9,0) нед (p = 0,745). Корреляции между временем проведения КТ-исследования после операции и изменением (Δ) суммарного объема легких после хирургической коррекции не выявлено (для всей когорты: r_s = –0,08, p = 0,54; для группы ИС: r_s = –0,12, p = 0,52; для группы НМС: r_s = 0,05, p = 0,78).

Анализ динамики объема легких выявил различия между группами (рис. 2).

Дополнительно была проанализирована частота разнонаправленных изменений суммарного объема легких в группах в результате операции. В группе ИС увеличение суммарного объема легких (разность «после операции» минус «до операции» (Δ) > 0) отмечено у 7 (23%), снижение (Δ < 0) — у 21 (70%), отсутствие динамики (Δ в пределах ±50 мл) — у 2 (7%) пациентов. В группе НМС увеличение суммарного объема легких отмечено у 24 (75%), снижение — у 8 (25%) пациентов, случаев без динамики не было (df = 2; p < 0,001).

Дополнительные результаты исследования

Исходные объемы правого и левого легкого в группе НМС были ниже, чем в группе ИС (табл. 3). Сравнение динамики объемов между группами показало, что разница изменений (ИС минус НМС) составила –115 мл справа и –262 мл слева. В обоих случаях величина эффекта (d Коэна) была значительной.

Исходная структура пневматизации легких между группами сильно различалась. При ИС преобладали нор-

мовентилируемые участки, тогда как при НМС их доля была снижена до 45,8% справа и 48,6% слева при увеличении объема зон гиповентиляции и ателектазов. После операции в группе НМС отмечено перераспределение зон в пользу нормовентиляции за счет сокращения гиповентилируемых и ателектатических участков. В группе ИС статистически значимых изменений показателей пневматизации не отмечено (табл. 4).

Исходный показатель деформации позвоночника (угол Кобба) в группах не различался. Изменение показателя в результате хирургической коррекции в группах было сопоставимым (табл. 5).

Нежелательные последствия хирургической коррекции

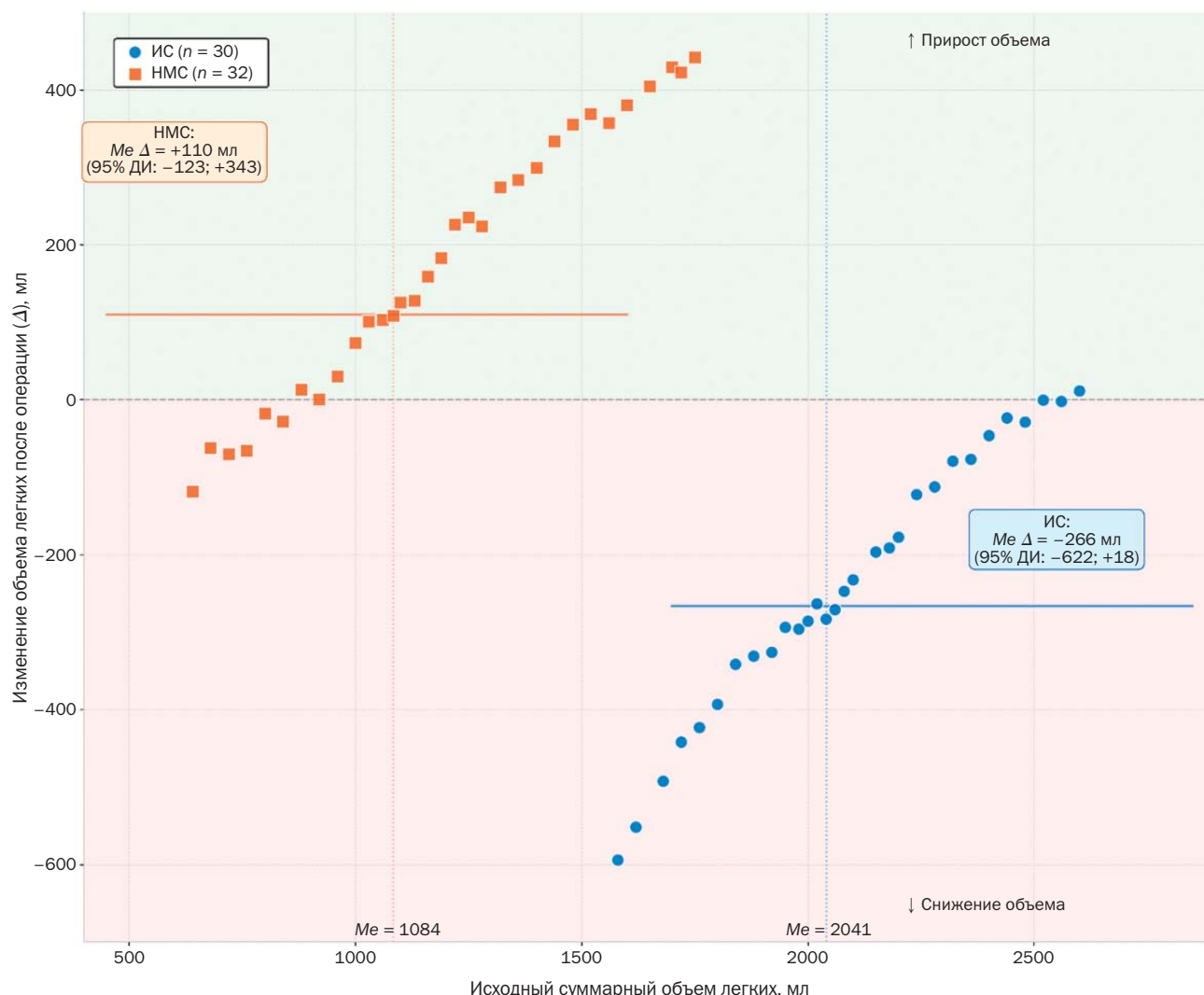
Неврологических осложнений (дефицит двигательных или чувствительных функций, дисфункция тазовых органов) в послеоперационном периоде не зафиксировано. В соответствии с критериями исключения, в исследовании не использовали данные пациентов, которым требовалась принудительная или вспомогательная ИВЛ более 2 сут после операции. Иные потенциально возможные осложнения послеоперационного периода (прежде всего гематомы, имплант-ассоциированные инфекции, миграция или поломки металлоконструкций, отдаленные потери коррекции и псевдоартрозы) в настоящем исследовании не анализировали.

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

После хирургической коррекции сопоставимых по величине деформации позвоночника ИС и НМС отмечены разные по характеру изменения объемно-плотностных характеристик легких. Так, при НМС происходит зна-

Рис. 2. Связь исходного суммарного объема легких с его изменением после хирургической коррекции (Δ) у подростков с ИС и НМС
Fig. 2. Correlation between baseline total lung volume and its change (Δ) after surgical correction in adolescents with IS and NMS



Примечание. По горизонтали — исходный суммарный объем легких (мл), по вертикали — изменение объема легких после операции (Δ , мл). Горизонтальные сплошные линии — медианные значения Δ в группах. Вертикальные пунктирные линии — медианные исходные объемы. Размер эффекта d Козна = 1,02 (большой эффект). Δ — разница («после» минус «до»). Me — медиана; ДИ — доверительный интервал; ИС — идиопатический сколиоз; НМС — нейромышечный сколиоз.

Note. Horizontal axis — baseline total lung volume (mL); vertical axis — postoperative change in lung volume (Δ , mL). Horizontal solid lines represent median Δ values in each group. Vertical dashed lines represent median baseline volumes. Effect size Cohen's $d = 1.02$ (large effect). Δ — difference (postoperative minus preoperative). Me — median; CI (ДИ) — confidence interval; IS (ИС) — idiopathic scoliosis; NMS (НМС) — neuromuscular scoliosis.

Таблица 3. Динамика объемов правого и левого легкого (мл) после хирургической коррекции ИС и НМС у подростков

Table 3. Dynamics of right and left lung volumes (mL) after surgical correction of IS and NMS in adolescents

Показатель	Группа	До операции	После операции	Δ , мл	Разница Δ (95% ДИ), мл	p	d
Правое легкое	ИС	1031 (787; 1275)	941 (743; 1139)	-90 (-288; +52)	-115 (-236; +3)	0,012	0,63
	НМС	591 (343; 807)	616 (411; 900)	+25 (-98; +147)			
Левое легкое	ИС	1011 (788; 1234)	834 (667; 1000)	-177 (-334; -20)	-262 (-410; -115)	< 0,001	0,98
	НМС	493 (296; 740)	578 (399; 826)	+85 (-22; +192)			

Примечание. Показатели описаны медианой (Q_1 ; Q_3). Δ — разница «после» минус «до». Разница Δ между группами представлена разностью медиан (ИС минус НМС) с 95% ДИ, рассчитанной по методу Ходжеса – Лемана, p -значение — с применением U -критерия Манна – Уитни, d Козна — по средним арифметическим значениям и стандартным отклонениям. ИС — идиопатический сколиоз; НМС — нейромышечный сколиоз.

Note. Indicators are presented as median (Q_1 ; Q_3). Δ — difference (postoperative minus preoperative). The difference in Δ between groups is presented as the median difference (IS minus NMS) with 95% CI calculated via the Hodges – Lehmann method; p -value was calculated via the Mann – Whitney U test; Cohen's d was calculated via arithmetic means and standard deviations. IS (ИС) — idiopathic scoliosis; NMS (НМС) — neuromuscular scoliosis.

Таблица 4. Изменение (Δ) плотностных зон легочной паренхимы после операции у подростков с ИС ($n = 30$) и НМС ($n = 32$)
Table 4. Changes (Δ) in density-defined zones of lung parenchyma after surgery in adolescents with IS ($n = 30$) and NMS ($n = 32$)

Зона	Легкое	Группа	До операции, %	После операции, %	Δ , %	Разница Δ (95% ДИ), %	p	d Коэна
Нормовентиляция	Правое	ИС	86,1 (75,9;94,0)	84,6 (71,2;93,0)	-0,2 (-5,4; +3,9)	-16,5 (-25,1; -8,0)	< 0,001	1,18
		НМС	45,8 (19,3;72,3)	62,3 (39,2;85,4)	+16,5 (8,0; 24,9)			
	Левое	ИС	84,8 (69,2;93,0)	88,9 (62,1;94,8)	+1,0 (-3,2; +5,0)	-14,0 (-22,5; -5,5)	0,002	1,01
		НМС	48,6 (23,2;74,0)	64,2 (41,2;87,2)	+15,6 (8,0; 21,0)			
Гиповентиляция	Правое	ИС	8,1 (3,2;16,2)	9,1 (5,8;20,5)	+0,6 (-2,1; +3,7)	+14,0 (6,5; 21,5)	< 0,001	1,07
		НМС	38,0 (19,0;50,0)	22,0 (12,0;42,0)	-15,0 (-20,5; -5,0)			
	Левое	ИС	9,4 (4,2;16,2)	7,0 (5,0;11,8)	-0,9 (-4,0; +2,1)	+9,0 (2,8; 15,2)	0,005	0,84
		НМС	35,7 (16,4;55,0)	26,0 (8,0;40,0)	-9,3 (-14,0; -3,0)			
Ателектазы	Правое	ИС	3,5 (2,0;10,1)	4,1 (1,5;7,5)	+0,2 (-0,8; +1,4)	+5,0 (2,1; 7,9)	0,001	0,92
		НМС	18,0 (8,5;19,0)	11,2 (3,1;19,3)	-4,8 (-7,1; -1,5)			
	Левое	ИС	5,1 (2,0;12,0)	2,3 (0,4;5,4)	-1,4 (-3,6; +0,1)	+5,5 (1,9; 9,1)	0,004	0,88
		НМС	16,9 (5,6;28,2)	10,0 (3,0;16,0)	-6,9 (-9,6; -2,4)			
Эмфизема	Правое	ИС	0,0 (0,0;0,2)	0,2 (0,0;0,6)	+0,1 (-0,1; +0,4)	+0,1 (-0,2; +0,5)	0,68	0,46
		НМС	0,0 (0,0;0,1)	0,0 (0,0;0,0)	0,0 (-0,1; +0,1)			
	Левое	ИС	0,0 (0,0;0,2)	0,1 (0,0;0,2)	0,0 (-0,1; +0,2)	0,0 (-0,2; +0,3)	0,81	0,06
		НМС	0,0 (0,0;0,2)	0,0 (0,0;0,2)				

Примечание. Показатели описаны с указанием медианы (Q_1 ; Q_3). Δ — изменение после операции («после» минус «до»). Разница Δ (ИС минус НМС) и 95% ДИ рассчитаны по методу Ходжеса – Лемана, p -значения — с применением U -критерия Манна – Уитни, d Коэна — по средним арифметическим и стандартным отклонениям.

Note. Indicators are presented as median (Q_1 ; Q_3). Δ — postoperative change (postoperative minus preoperative). The difference in Δ (IS minus NMS) and 95% CI were calculated via the Hodges – Lehmann method; p -values were calculated via the Mann – Whitney U test; Cohen's d was calculated via arithmetic means and standard deviations.

Таблица 5. Величина сколиотической деформации и эффективность ее коррекции у пациентов с ИС и НМС
Table 5. Scoliotic deformity and correction rate in patients with IS and NMS

Оцениваемый параметр	ИС ($n = 30$)	НМС ($n = 32$)	p	d Коэна
Угол Кобба до операции, °	62,7 (50,0; 76,7)	75,5 (56,0; 91,0)	0,187	0,28
Угол Кобба после операции, °	18,5 (12,0; 26,0)	22,0 (15,0; 30,0)	0,321	0,21
Эффективность коррекции (Δ), %	70,5 (65,0; 76,0)	68,0 (60,0; 75,0)	0,456	0,10
Разница Δ (95% ДИ), %	2,5 (-4,5; 9,5)		0,456	–

Примечание. Описание переменных выполнено с указанием медианы (Q_1 ; Q_3). Δ — изменение после операции (%). Межгрупповые сравнения проведены с использованием U -критерия Манна – Уитни. Разница Δ (ИС минус НМС) и 95% ДИ рассчитаны по методу Ходжеса – Лемана, p -значения — с применением U -критерия Манна – Уитни, d Коэна — по средним арифметическим значениям и стандартным отклонениям. ИС — идиопатический сколиоз; НМС — нейромышечный сколиоз.

Note. Variables description is presented with median (Q_1 ; Q_3). Δ — postoperative change (%). Intergroup comparisons were performed via the Mann – Whitney U test. The difference in Δ (IS minus NMS) and 95% CI were calculated via the Hodges – Lehmann method; p -values were calculated via the Mann – Whitney U test; Cohen's d was calculated via arithmetic means and standard deviations. IS (ИС) — idiopathic scoliosis; NMS (НМС) — neuromuscular scoliosis.

чимый прирост как объемов каждого легкого, так и их суммарного объема при увеличении доли нормовентилируемых и уменьшении гиповентилируемых и ателектатических зон. У больных с ИС после операции объем легких существенно не меняется или даже может уменьшаться, а в структуре пневматизации легких отмечено только уменьшение зон ателектазов слева — на вогнутой стороне типичной грудной сколиотической дуги.

Ограничения исследования

Одно из ключевых ограничений настоящего исследования — его ретроспективный дизайн и невозможность стандартизировать условия проведения КТ-исследования (прежде всего синхронизации фазы, глубины и возмож-

ности задержки дыхания), определяющие объемные и пневматизационные характеристики легких. Еще одно ограничение — небольшой размер выборки и, соответственно, потенциально низкая статистическая мощность исследования. Следует также отметить невозможность экстраполировать результаты исследования на все случаи НМС, среди которых больные с ДЦП составляют подавляющее большинство (84% в нашей когорте, что согласуется с данными литературы [2]), но существенно отличаются по динамике состояния дыхания от прогрессирующе развивающихся миопатических заболеваний (например, спинальной мышечной атрофии). И наконец, подчеркнем, что анализ состояния легких в нашем исследовании проведен только в раннем послеоперационном

периоде, что не исключает их изменений в отдаленном периоде после хирургической коррекции деформаций позвоночника.

Интерпретация результатов исследования

Описанные нами результаты хирургической коррекции ИС у подростков согласуются с данными V. Sarwahi и соавт., которые не обнаружили с помощью трехмерной КТ-волюметрии значимых изменений общего объема легких, а также объемов правого и левого легкого после задней инструментальной фиксации позвоночника (медиана времени между до- и послеоперационной КТ — 18 мес) у подростков с ИС ($n = 29$). И вместе с тем, было установлено уменьшение асимметрии гемитораксов и выраженного реберного горба [16]. D.K. Lee и соавт. через 4 нед после операции отметили снижение суммарного легочного объема у 42 из 55 оперированных подростков с ИС в среднем на 12% [18], а N. Fujita и соавт. через 2 года после операции — их незначительное изменение (в среднем 2,75 л до и 2,82 л после, $p = 0,06$) в группе из 111 пациентов при снижении показателя более чем на 10% от исходного у 18% [19]. Независимым предиктором такого снижения оказалась протяженность инструментальной фиксации ≥ 11 позвоночных сегментов [19]. Возможный негативный эффект устранения деформации позвоночника D.H.R. Kempen и соавт. [7] объясняли «пространственной компенсацией», сохраняющей объема легких и респираторные показатели при относительно больших деформациях у части пациентов, и «декомпенсацией» — при уменьшении реберного горба в результате деротации позвоночника при коррекции ИС, приводящей к уменьшению объема каждого эпизода гемиторакса и, как следствие, к сохранению или даже снижению объема легких.

После коррекции деформации позвоночника при НМС нами отмечена принципиально иная картина: увеличение суммарного объема легких, объема справа и в большей мере — слева. Более выраженные изменения легких слева после хирургической коррекции сколиоза описаны и в других работах [14, 15].

Сопоставление динамики зон пневматизации паренхимы легких в нашем исследовании с данными литературы затруднительно, поскольку во многих исследованиях ограничивались только КТ-волюметрией [16, 18, 19] или функциональными тестами [23, 24, 28]. В некоторых работах у пациентов с НМС после хирургической коррекции деформации позвоночника зафиксировано существенное увеличение доли нормовентилируемых участков и уменьшение зон гиповентиляции и ателектазов, что согласуется с нашими наблюдениями и косвенно подтверждается результатами исследований, в которых не обнаружено стабилизации функции внешнего дыхания через 3–4 мес после операции [14, 15]. Возможно, прирост анатомических показателей легких в ранние сроки после операции не приводит к улучшению функциональных показателей у больных с НМС из-за слабости дыхательной мускулатуры [12, 13, 26]. Тем не менее, обнаруженная нами отрицательная корреляция между углом Кобба и суммарным объемом легких исключительно в группе НМС ($r_s = -0,91$; $p < 0,001$), но не ИС ($r_s = -0,19$; $p = 0,14$) подтверждает ведущую роль механического фактора деформации в формировании рестрикции [2, 11, 12]. Отсутствие связи между углом Кобба и суммарным объемом легких при ИС согласуется с представлениями о том, что у подростков с ИС даже значительная фронтальная дуга может длительно компенсироваться за счет ротационного компонента и формы грудной клетки, не приводя к пропорциональному снижению объема легких [5, 7, 16], а ее коррекция

соответственно не дает такого же прироста объема легких, как при нейромышечном сколиозе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У подростков с НМС, в отличие от ИС, после хирургической коррекции деформации позвоночника отмечен значимый прирост как суммарного объема легких, так и объемов легких справа и в большей степени слева. При сопоставимой по эффективности хирургической коррекции деформации позвоночника у пациентов с НМС доля зон легких с нормовентиляцией увеличилась, а зон с гиповентиляцией и ателектазами уменьшилась в большей степени, чем у пациентов с ИС.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Отсутствует.

FINANCING SOURCE

Not specified.

РАСКРЫТИЕ ИНТЕРЕСОВ

Авторы статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

DISCLOSURE OF INTEREST

Not declared.

ВКЛАД АВТОРОВ

А.В. Макарова — определение концепции, работа с данными, анализ данных, проведение исследования, разработка методологии, написание черновика рукописи.

А.А. Першин — работа с данными, анализ данных, проведение исследования, валидация.

Н.О. Хусаинов — работа с данными, анализ данных, проведение исследования, валидация.

О.С. Маслак — разработка методологии, обеспечение исследования.

А.Ю. Мушкин — определение концепции, работа с данными, анализ данных, проведение исследования, разработка методологии, руководство исследованием, пересмотр и редактирование рукописи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Anna V. Makarova — study concept, data processing, data analysis, conducting the study, methodology development, manuscript draft writing.

Andrey A. Pershin — data processing, data analysis, conducting the study, validation.

Nikita O. Khusainov — data processing, data analysis, conducting the study, validation.

Olga S. Maslak — methodology development, research support.

Alexandr Yu. Mushkin — study concept, data processing, data analysis, conducting the study, methodology development, study guidance, manuscript review and editing.

ORCID

А.В. Макарова

<https://orcid.org/0000-0003-2253-2289>

А.А. Першин

<https://orcid.org/0000-0001-9963-3294>

Н.О. Хусаинов

<https://orcid.org/0000-0003-3036-3796>

О.С. Маслак

<https://orcid.org/0000-0002-9202-8064>

А.Ю. Мушкин

<https://orcid.org/0000-0002-1342-3278>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Идиопатический сколиоз: клинические рекомендации / Ассоциация травматологов-ортопедов России (АТОР); Ассоциация хирургов-вертебрологов; Союз реабилитологов России. — М.; 2024. — 94 с. [*Idiopaticeskii skolioz: Clinical guidelines. Association of Traumatologists and Orthopedists of Russia (ATOR); Association of Vertebrologists; Union of Rehabilitation Specialists of Russia. Moscow; 2024. 94 p. (In Russ.)*]
2. Нервно-мышечный сколиоз: клинические рекомендации / Ассоциация травматологов-ортопедов России (АТОР); Ассоциация хирургов-вертебрологов; Союз реабилитологов России. — М.; 2025. — 91 с. [*Nervno-myshechnyi skolioz: Clinical guidelines. Association of Traumatologists and Orthopedists of Russia (ATOR); Association of Vertebrologists; Union of Rehabilitation Specialists of Russia. Moscow; 2025. 91 p. (In Russ.)*]
3. Janicki JA, Alman B. Scoliosis: Review of diagnosis and treatment. *Paediatr Child Health*. 2007;12(9):771–776. doi: <https://doi.org/10.1093/pch/12.9.771>
4. Wang Y, Wang D, Zhang G, et al. Effects of spinal deformities on lung development in children: a review. *J Orthop Surg Res*. 2023;18(1):246. doi: <https://doi.org/10.1186/s13018-023-03665-0>
5. Kan MMP, Negrini S, Di Felice F, et al. Is impaired lung function related to spinal deformities in patients with adolescent idiopathic scoliosis? A systematic review and meta-analysis — SOSORT 2019 award paper. *Eur Spine J*. 2023;32(1):118–139. doi: <https://doi.org/10.1007/s00586-022-07371-z>
6. Mbamalu EK, Hyacinthe J, Hui A, et al. Early Onset Scoliosis and Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Review of the Literature and Correlations With Pulmonary Dysfunction. *Cureus*. 2023;15(11):e48900. doi: <https://doi.org/10.7759/cureus.48900>
7. Kempen DHR, Heemskerk JL, Kaçmaz G, et al. Pulmonary function in children and adolescents with untreated idiopathic scoliosis: a systematic review with meta-regression analysis. *Spine J*. 2022;22(7):1178–1190. doi: <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2021.12.011>
8. Mayer OH, Redding G. Chest and spinal disease in patients with progressive neuromuscular disease. *Paediatr Respir Rev*. 2025;55:30–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prrv.2024.10.001>
9. Khan F, Khan A, Chinnery L, et al. Surgical management of neuromuscular scoliosis in paediatric patients: experiences from a tertiary centre multidisciplinary team. *BMJ Paediatr Open*. 2025;9(1):e002456. doi: <https://doi.org/10.1136/bmjpo-2023-002456>
10. Ortiz-Garcia NY, Rueda-Capistran DE, Kumar A, et al. The impact of respiratory muscle training on respiratory function in patients with neuromuscular disease: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Sports Sci Med Rehabil*. 2025;17(1):168. doi: <https://doi.org/10.1186/s13102-025-01198-z>
11. Foti Randazzese S, Fenu G, Calogero C, et al. Managing Cough in Pediatric Neuromuscular Disorders: Lung Function and Care Strategies. *Children (Basel)*. 2025;12(10):1377. doi: <https://doi.org/10.3390/children12101377>
12. Hull J, Anipravan R, Chan E, et al. British Thoracic Society guideline for respiratory management of children with neuromuscular weakness. *Thorax*. 2012;67(Suppl 1):i1–i40. doi: <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2012-201964>
13. Murphy RF, Mooney JF 3rd. Current concepts in neuromuscular scoliosis. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2019;12(2):220–227. doi: <https://doi.org/10.1007/s12178-019-09552-8>
14. Макарова А.В., Альшаова М.А.А., Маслак О.С., Мушкин А.Ю. Изменение объема и пневматизации легких у детей в раннем периоде после хирургической коррекции тяжелого нейромышечного сколиоза, осложненного дыхательной недостаточностью: когортное исследование // *Вопросы современной педиатрии*. — 2024. — Т. 23. — № 3. — С. 174–180. — doi: <https://doi.org/10.15690/vsp.v23i3.2766> [Makarova AV, Alshaowa MAA, Maslak OS, Mushkin AYU. Lung Volume and Pneumatization Changes in Children in Early Post-Surgical Period After Correction of Severe Neuromuscular Scoliosis Complicated with Respiratory Failure: Cohort Study. *Voprosy sovremennoi pediatrii — Current Pediatrics*. 2024;23(3):174–180. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.15690/vsp.v23i3.2766>]
15. Макарова А.В., Першин А.А., Сундюков А.Р. и др. Эффективность КТ-волюметрии для динамической оценки респираторных изменений при хирургической коррекции нейромышечного сколиоза у детей // *Вопросы практической педиатрии*. — 2025. — Т. 20. — № 2. — С. 47–53. — doi: <https://doi.org/10.20953/1817-7646-2025-2-47-53> [Makarova AV, Pershin AA, Sundyukov AR, et al. Efficacy of CT volumetry for dynamic assessment of respiratory changes during surgical correction of neuromuscular scoliosis in children. *Voprosy prakticheskoi pediatrii = Clinical Practice in Pediatrics*. 2025;20(2):47–53. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.20953/1817-7646-2025-2-47-53>]
16. Sarwahi V, Sugarman EP, Wollowick AL, et al. Scoliosis surgery in patients with adolescent idiopathic scoliosis does not alter lung volume: a 3-dimensional computed tomography-based study. *Spine*. 2014;39(6):E399–E405. doi: <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000000203>
17. Fu J, Liu C, Zhang YG, et al. Three-dimensional computed tomography for assessing lung morphology in adolescent idiopathic scoliosis following posterior spinal fusion surgery. *Orthop Surg*. 2015;7(1):43–49. doi: <https://doi.org/10.1111/os.12151>
18. Lee DK, Chun EM, Suh SW, et al. Evaluation of postoperative change in lung volume in adolescent idiopathic scoliosis: measured by computed tomography. *Indian J Orthop*. 2014;48(4):360–365. doi: <https://doi.org/10.4103/0019-5413.136223>
19. Fujita N, Yagi M, Miyahara G, et al. Impact of fusion for adolescent idiopathic scoliosis on lung volume measured with computed tomography. *Eur Spine J*. 2019;28(9):2034–2041. doi: <https://doi.org/10.1007/s00586-019-06025-x>
20. Kim HS, Kwon JW, Park KB. Clinical Issues in Indication, Correction, and Outcomes of the Surgery for Neuromuscular Scoliosis: Narrative Review in Pedicle Screw Era. *Neurospine*. 2022;19(1):177–187. doi: <https://doi.org/10.14245/ns.2143246.623>
21. Hsu PC, Feng CK, Huang SH, et al. Health-related quality of life in children and adolescent with different types of scoliosis: A cross-sectional study. *J Chin Med Assoc*. 2019;82(2):161–165. doi: <https://doi.org/10.1097/JCMA.0000000000000020>
22. Soini V, Syvänen J, Helenius L, et al. Health-related quality of life after segmental pedicle screw instrumentation: a matched comparison of patients with neuromuscular and adolescent idiopathic scoliosis. *Acta Orthop*. 2023;94:165–170. doi: <https://doi.org/10.2340/17453674.2023.11962>
23. de Oliveira Jorge PP, de Lima JHP, Chong E Silva DC, et al. Impulse oscillometry in the assessment of children's lung function. *Allergol Immunopathol (Madr)*. 2019;47(3):295–302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aller.2018.03.003>
24. Stanojevic S, Kaminsky DA, Miller MR, et al. ERS/ATS technical standard on interpretive strategies for routine lung function tests. *Eur Respir J*. 2022;60(1):2101499. doi: <https://doi.org/10.1183/13993003.01499-2021>
25. Mayer OH. Scoliosis and the impact in neuromuscular disease. *Paediatr Respir Rev*. 2015;16(1):35–42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prrv.2014.10.003>
26. Chiang J, Mehta K, Amin R. Respiratory Diagnostic Tools in Neuromuscular Disease. *Children (Basel)*. 2018;5(6):78. doi: <https://doi.org/10.3390/children5060078>
27. Hudec J, Prokopová T, Kosinová M, Gál R. Anesthesia and Perioperative Management for Surgical Correction of Neuromuscular Scoliosis in Children: A Narrative Review. *J Clin Med*. 2023;12(11):3651. doi: <https://doi.org/10.3390/jcm12113651>
28. Hashem M. Assessment of Pulmonary Function After Treatment of Scoliosis: Meta-Analysis and Review Article. *Medicina (Kaunas)*. 2025;61(7):1127. doi: <https://doi.org/10.3390/medicina61071127>
29. Alhammoud A, Othman Y, El-Hawary R, et al. The impact of scoliosis surgery on pulmonary function in spinal muscular atrophy: a systematic review. *Spine Deform*. 2021;9(4):913–921. doi: <https://doi.org/10.1007/s43390-021-00302-w>
30. Daghighi A, Tropp H. Computed tomography lung volume estimation and its relation to lung capacities and spine deformation. *J Spine Surg*. 2019;5(1):132–141. doi: <https://doi.org/10.21037/jss.2019.03.11>