

Параметры импульсной осциллометрии и диффузионная способность легких у больных туберкулезом легких: есть ли взаимосвязь?

Л.Д.Кириухина^{1,2} ✉, Е.В.Кокорина², П.К.Яблонский^{2,3}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт пульмонологии» Федерального медико-биологического агентства России: 115682, Россия, Москва, Ореховый бульвар, 28

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации: 191036, Россия, Санкт-Петербург, Лиговский проспект, 2–4

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Правительства Российской Федерации: 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

Резюме

Оценка легочного газообмена чрезвычайно важна у пациентов с заболеваниями органов дыхания, однако исследование диффузионной способности легких (ДСЛ) недоступно у ряда пациентов вследствие их физического состояния или когнитивных ограничений. При использовании импульсной осциллометрической системы (ИОС) участие пациента минимально, метод позволяет быстро и просто для пациента получить воспроизводимые измерения. **Целью** исследования являлось определение взаимосвязи изменений параметров импульсной осциллометрии и ДСЛ у больных туберкулезом легких (ТЛ). **Материалы и методы.** Проведено ретроспективное обсервационное исследование у взрослых пациентов с верифицированным диагнозом ТЛ, у которых выполнялись спирометрия, бодиплетизмография, исследование ДСЛ по монооксиду углерода (DL_{CO}), импульсная осциллометрия. В исследование не включались пациенты со стажем курения > 10 пачко-лет, неспецифическими заболеваниями органов дыхания, операциями на органах грудной клетки и вне-легочными причинами ограничения подвижности грудной клетки. Использовались тест Крускала–Уоллиса, критерий χ^2 , ранговая корреляция Спирмена, ROC-анализ. **Результаты.** Выявлена умеренная взаимосвязь между DL_{CO} и показателями ИОС: с частотной зависимостью резистанса ($Rrs5-20$), резонансной частотой ($Fres$), отклонением реактивного сопротивления на частоте 5 Гц от должной ($\Delta Xrs5$) и реактивным сопротивлением на частоте 5 Гц ($Xrs5$) ($-0,32$; $-0,33$; $-0,34$ и $0,32$ соответственно; $p < 0,05$). Показана заметная взаимосвязь площади реактанта (AX) с DL_{CO} и альвеолярным объемом (VA) ($-0,51$; $-0,57$ соответственно; $p < 0,05$) и умеренная взаимосвязь с индексом неравномерности вентиляции – плохо сообщающейся фракцией легких (*Poorly Communication Fraction* – PCF) $0,31$ ($p < 0,05$). По результатам ROC-анализа показано, что при снижении $DL_{CO} < 75\%$ пороговое значение $AX = 0,30$ кПа / л ($AUC = 0,746$), а при снижении $DL_{CO} < 50\%$ пороговое значение $AX = 0,41$ кПа / л ($AUC = 0,840$). **Заключение.** Установлено, что ДСЛ у больных ТЛ коррелирует с изменением общего дыхательного сопротивления и его компонентов.

Ключевые слова: импульсная осциллометрия, диффузионная способность легких, легочные функциональные тесты, легочный газообмен, туберкулез легких.

Конфликт интересов. Конфликт интересов авторами не заявлен.

Финансирование. Спонсорская поддержка исследования отсутствовала.

Этическая экспертиза. Исследование одобрено Локальным этическим комитетом Федерального государственного бюджетного учреждения «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации. От каждого пациента получено письменное информированное согласие.

© Кириухина Л.Д. и соавт., 2025

Для цитирования: Кириухина Л.Д., Кокорина Е.В., Яблонский П.К. Параметры импульсной осциллометрии и диффузионная способность легких у больных туберкулезом легких: есть ли взаимосвязь? *Пульмонология*. 2025; 35 (1): 75–85. DOI: 10.18093/0869-0189-2024-4593

Impulse oscillometry parameters and diffusing capacity of the lung in patients with pulmonary tuberculosis: is there an inter-relationship?

Larisa D. Kiryukhina^{1,2} ✉, Elena V. Kokorina², Petr K. Yablonskiy^{2,3}

¹ Federal State Budgetary Institution “Pulmonology Scientific Research Institute” under Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation: Orekhovyy bul’var 28, Moscow, 115682, Russia

² Russian Federation Healthcare Ministry Saint-Petersburg State Phthiopulmonology Research Institute: Ligovsky pr. 2 – 4, Saint-Petersburg, 191036, Russia

³ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg State University”, Government of the Russian Federation: Universitetskaya Naberezhnaya 7/9, Saint-Petersburg, 199034, Russia

Abstract

Assessment of pulmonary gas exchange is essential in patients with respiratory diseases. However, the diffusing capacity of the lung cannot be assessed in some patients due to their physical condition or cognitive limitations. Impulse oscillometry requires minimum patient cooperation, is

easy for patients, and allows for quick, reproducible measurements. **The aim** of the study was to determine the relationship between impulse oscillometry parameters and diffusing capacity of the lung in patients with pulmonary tuberculosis. **Methods.** This was a retrospective observational study in adult patients with a confirmed diagnosis of pulmonary tuberculosis. We evaluated their spirometry, body plethysmography, Carbon Monoxide Diffusing Capacity (DL_{CO}), and impulse oscillometry measurements. The study did not include patients with smoking experience of more than 10 pack-years, nonspecific respiratory diseases, chest surgery, and extrapulmonary causes of chest mobility restriction. The Kruskal – Wallis criterion, the χ^2 criterion, Spearman rank correlation, and ROC analysis were used. **Results.** A moderate relationship was revealed between DL_{CO} and IOS parameters: with frequency dependence of resistance (Rrs_{5-20}), resonant frequency (F_{res}), deviation of reactance at 5 Hz from the predicted value (ΔX_{rs5}), and reactance at 5 Hz (X_{rs5}) (-0.32 ; -0.33 ; -0.34 ; 0.32 , respectively, $p < 0.05$). The reactance area (AX) showed a considerable relationship with DL_{CO} and alveolar volume (VA) (-0.51 ; -0.57 , respectively, $p < 0.05$) and a moderate relationship with the poorly *Poorly Communication Fraction* (PCF) 0,31 ($p < 0,05$). The ROC analysis showed that if DL_{CO} was less than 75%, the cut-off level of AX was 0.30 kPa/l (AUC = 0,746), and if DL_{CO} was less than 50%, the cut-off level of AX was 0.41 kPa/l (AUC = 0,840). **Conclusion.** The diffusing capacity of the lung in patients with pulmonary tuberculosis correlates with the changes in total respiratory resistance and its components.

Key words: impulse oscillometry, diffusing capacity of the lung, pulmonary function test, pulmonary gas exchange, pulmonary tuberculosis.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study was not sponsored.

Ethical review. The study was approved by the Local Ethics Committee of the Russian Federation Healthcare Ministry Saint-Petersburg State Phthisiopulmonology Research Institute. Each participant gave written informed consent to participate in the study.

© Kiryukhina L.D. et al., 2025

For citation: Kiryukhina L.D., Kokorina E.V., Yablonskiy P.K. Impulse oscillometry parameters and diffusing capacity of the lung in patients with pulmonary tuberculosis: is there an inter-relationship? *Pul'monologiya*. 2025; 35 (1): 75–85 (in Russian). DOI: 10.18093/0869-0189-2024-4593

Оценка функциональных возможностей системы дыхания является важным компонентом в процессе принятия решений для пациентов с респираторными заболеваниями, при дифференциальной диагностике одышки, предоперационном обследовании. Это помогает не только поставить конкретный диагноз, но и оценить степень тяжести заболевания для назначения соответствующей фармакотерапии, определить прогноз и оценить реакцию на терапию. В настоящее время спирометрия и исследование диффузионной способности легких (ДСЛ) являются наиболее часто используемыми в клинической практике методами определения функции легких. Однако техника их выполнения сложна, поскольку от пациента требуются интенсивные выдохи и вдохи, координация с командами оператора, его физическая способность сделать максимальные дыхательные движения, задержать дыхание. Также у детей в возрасте до 5 лет, пожилых «хрупких» пациентов и лиц с физическими и когнитивными ограничениями стандартные методы исследования функции легких неприменимы.

Метод форсированных осцилляций (МФО), или осциллометрия, интересен тем, что от пациента не требуются усилия, т. к. измерения проводятся при обычном дыхании [1, 2]. Специальным устройством генерируются звуковые волны, которые передаются в дыхательную систему во время спокойного дыхания. Идея использования звуковых волн для исследования механических свойств дыхательной системы предложена А.В.Дубоис в 1956 г. Модификация МФО — импульсная осциллометрическая система (ИОС) — разработана Е.Д.Михайelson в 1976 г., а первые приборы для клинического применения ИОС внедрены в практику фирмой *Jaeger* в 1990-х гг. [3]. Как и в случае с МФО, при использовании ИОС применяются импульсы давления, подаваемые в дыхательную систему, что вызывает реакцию потока. В ИОС используется смешанная многочастотная форма сигнала и обеспечиваются улучшенные характеристики соотношения сигнал / шум. Преимущества другого вида генерации

волн заключаются в минимальном участии пациента, быстром, простом и воспроизводимом измерении [4].

По результатам многих исследований установлена сильная взаимосвязь между параметрами ИОС, показателями спирометрии и бодиплетизмографии у пациентов с бронхообструктивными заболеваниями [5–11]. В последние годы возрос интерес к аналогичным исследованиям для заболеваний с рестриктивным вариантом вентиляционных нарушений [12–19]. По данным проведенных по всему миру исследований показано, что при использовании ИОС можно получить дополнительную информацию, также метод может служить успешной альтернативой спирометрии в определенных клинических ситуациях.

Анализ корреляции параметров ИОС и ДСЛ проводился в единичных исследованиях. Это связано в первую очередь с тем, что исследование ДСЛ проводится для определения способности легких переносить газ из вдыхаемого воздуха в кровотоки, а с помощью ИОС оцениваются механические свойства дыхательной системы — общее дыхательное сопротивление, т. н. импеданс дыхательной системы (Zrs). Его компоненты — резистанс (Rrs) и реактанс (Xrs) — являются силами, которые необходимо преодолеть, чтобы воздух мог поступать в дыхательную систему и выходить из нее. Rrs представляет сумму аэродинамического сопротивления дыхательных путей, вязкостного сопротивления тканей легких и грудной клетки, при различных частотах колебаний отражает калибр дыхательных путей на основе информации о давлении в проводящих дыхательных путях от рта до мелких бронхов [1, 20]. Xrs включает в себя силы движущегося столба воздуха, определяемые как инерционность, и упругие свойства преимущественно периферических отделов дыхательной системы [1, 21].

Изменение механических свойств интерстициальной ткани легких, гетерогенность паренхимы легких и сопротивления дыхательных путей меняют характеристики осцилляторной механики на разных частотах осцилляций и, несомненно, по-разному влияют на ле-

точный газообмен. По результатам корреляционного анализа изменений легочного газообмена и осцилляторной механики показана взаимосвязь параметров ДСЛ и ИОС. Однако характер и сила взаимосвязи при разной бронхолегочной патологии различались. У пациентов с идиопатическим легочным фиброзом и эмфиземой легких снижение ДСЛ было связано с изменением реактивного компонента общего дыхательного сопротивления — Xrs [15, 19]. При обструкции чаще выявлялась взаимосвязь ДСЛ с частотным поведением резистанса Rrs [14, 17].

Туберкулез легких (ТЛ) разнороден по морфологическим характеристикам специфического поражения и проявляется разными типами вентиляционных нарушений [22]. Доля пациентов с ТЛ, у которых нельзя оценить состояние респираторной функции обычными методами, достаточно высока — это ослабленные больные, с кровохарканьем, наличием дренажей, в раннем послеоперационном периоде. Однако использованию методов осцилляторной механики при специфическом поражении легочной ткани посвящены единичные исследования [23–25]. Попытки определения особенностей осцилляторной механики при нарушении легочного газообмена с ТЛ не предпринимались. Простотой выполнения ИОС, в отличие от метода определения ДСЛ, объясняется актуальность исследования для улучшения диагностики респираторных нарушений, особенно у тяжелых пациентов.

Целью исследования явилось определение взаимосвязи изменений параметров импульсной осциллометрии и ДСЛ у больных ТЛ.

Материалы и методы

В 2015–2023 гг. на базе Торакального центра Федерального государственного бюджетного учреждения «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации проведено одноцентровое ретроспективное обсервационное исследование ($n = 293$: 117 (33,9 %) мужчин, 176 (60,1 %) женщин; медиана (Me) (25-й, 75-й перцентили) возраста составила 31,5 (27,0; 40,0) года; Me роста — 1,7 (1,6; 1,8) м, Me массы тела — 60 (54; 70) кг).

Критерии включения в исследование:

- возраст старше 18 лет;
- диагноз ТЛ, верифицированный этиологическими либо гистологическими методами;
- наличие комплексного исследования функции внешнего дыхания (ДСЛ, спирометрия, бодиплетизмография, импульсная осциллометрия).

Критерии не включения:

- анамнез курения > 10 пачко-лет;
- сопутствующие неспецифические заболевания органов дыхания;
- операции на органах грудной клетки;
- внелегочные причины ограничения подвижности грудной клетки.

Никогда не курили 129 (44,0 %) пациентов, у 112 (38,3 %) установлен отягощенный анамнез курения,

52 (17,7 %) являлись экс-курильщиками. Me индекса курения составляла 1,0 (0,0; 5,3) пачко-лет.

Среди клинических форм ТЛ преобладал фиброзно-кавернозный ТЛ — 119 (40,6 %) пациентов, реже встречались туберкулемы, кавернозный и инфильтративный ТЛ — у 63 (21,5 %), 46 (15,7 %) и 36 (12,3 %) пациентов соответственно; реже всего наблюдался диссеминированный ТЛ — 29 (9,9 %) случаев.

В зависимости от состояния легочного газообмена пациенты были распределены на 2 группы:

- 1-я группа — лица с нормальной ДСЛ;
- 2-я группа — пациенты со сниженной ДСЛ.

Исследование одобрено Локальным этическим комитетом Федерального государственного бюджетного учреждения «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации. От каждого пациента получено письменное информированное согласие.

Комплексное исследование функции внешнего дыхания выполнялось на установке *MasterScreen Body Diffusion (VIASYS Healthcare, Германия)* согласно рекомендациям совместной рабочей группы Американского торакального общества, Европейского респираторного общества по стандартизации легочных функциональных исследований [26–28] и Национального руководства по функциональной диагностике [29].

Для оценки вентиляционных нарушений выполнялись спирометрия и бодиплетизмография. Анализировались следующие показатели:

- общая емкость легких (ОЕЛ);
- жизненная емкость легких (ЖЕЛ);
- остаточный объем легких (ООЛ);
- внутригрудной объем (ВГО);
- объем форсированного выдоха за 1-ю секунду ($ОФВ_1$);
- соотношение $ОФВ_1$ и форсированной ЖЕЛ ($ОФВ_1 / ФЖЕЛ$);
- средняя объемная скорость выдоха между 25 и 75 % ФЖЕЛ ($СОС_{25-75}$).

Для определения легочного газообмена проводилось исследование ДСЛ по монооксиду углерода (DL_{CO}) методом одиночного вдоха с задержкой дыхания с использованием многокомпонентной газовой смеси с концентрацией монооксида углерода (СО) 0,25 %, инертного газа гелия (Не) — 9 %, кислорода — 19 %, остальное — азот. При измерении DL_{CO} учитывалась величина ЖЕЛ, измеренная методом бодиплетизмографии; приемлемыми считались маневры, при которых величина ЖЕЛ составляла ≥ 90 % от измерения в кабине бодиплетизмографа.

Анализировались следующие показатели:

- трансфер-фактор (DL_{CO}) с коррекцией по гемоглобину;
- альвеолярный объем (VA);
- трансфер-коэффициент (DL_{CO} / VA).

За снижение ДСЛ принимались значения DL_{CO} меньше показателя нижней границы нормы (НГН) (z -оценка < (-1,645)).

Для оценки нарушения распределения вдыхаемого газа определялась «плохо сообщающаяся доля» ОЕЛ (*Poorly Communication Fraction* – PCF). PCF рассчитывалась как разница между ОЕЛ, измеренной с помощью бодиплетизмографии, и VA ($1 - (VA / \text{ОЕЛ}) (\%)$); за нормальную величину принималось значение $< 15 \%$ [30].

Для исключения влияния антропометрических характеристик значения показателей, имеющих должные величины, выражались в процентном отношении от должной для соответствующих пола, роста, массы тела, возраста. В качестве референсных значений использовались должные величины, предложенные Европейским сообществом угля и стали (*European Coal and Steel Community*, 1993) [31].

Импульсная осциллометрия выполнялась на приборе *MasterScreen* с модулем импульсной осциллометрии (*Viasys Healthcare*, Германия) в соответствии с техническими стандартами и рекомендациями рабочей группы Европейского респираторного общества [20, 32].

Анализировались общее дыхательное сопротивление на частоте 5 Гц (Z_{rs5}) и составляющие его компоненты – резистивный (резистанс) и реактивный (реактанс) в частотном диапазоне от 5 до 35 Гц.

Оценивались резистанс на частоте 5 Гц (R_{rs5}), отражающий общее сопротивление экстраторакальных, центральных и периферических дыхательных путей, и на частоте 20 Гц (R_{rs20}) – проксимальный резистанс. Также рассчитывался параметр, который повышается при преобладании дистальной обструкции – абсолютная частотная зависимость резистанса, определяемая как разница между величиной резистанса на частоте 5 и 20 Гц (R_{rs5-20}). Параметр R_{rs5-20} значительно более чувствителен к сужению дистальных дыхательных путей, чем большинство других частотных параметров.

Реактивное сопротивление отражает баланс между инерционными и упругими свойствами растягиваемых дыхательных путей. Определялись реактанс на частоте 5 Гц (X_{rs5}) и отклонение X_{rs5} от должной величины ($\Delta X_{rs5} = X_{rs5} - X_{rs5}^{\text{долж.}}$). Определялись также дополнительные параметры, отражающие изменение реактивного сопротивления в периферических отделах легких – резонансная частота (F_{res}) и площадь под кривой реактанса между 5 Гц и F_{res} (AX).

В качестве должных величин показателей импульсной осциллометрии были выбраны нормативы *E. Vogel* и *H. Smidt* [33]. За нормальные значения параметров принимались величины менее НГН, за нормальную величину параметра AX принимались значения $\leq 0,32$ кПа / л [4].

Статистический анализ производился с использованием языка программирования R (версия 4.2.2). Оценка нормальности распределения данных выполнялась при помощи критерия Шапиро–Уилка. Количественные данные описывались как среднее (стандартное отклонение) или *Me* (25-й, 75-й перцентили), в зависимости от характера распределения. Для сравнения групп между собой по уровню признака, измеренного количественно, использовался тест

Крускала–Уоллиса, при выявлении статистической значимости выполнялся *Dunn's post-hoc*-тест. Для сравнения категориальных переменных использовался критерий χ^2 , при выявлении статистической значимости – поправка непрерывности Йейтса. Корреляционный анализ с построением корреляционных матриц выполнялся с использованием ранговой корреляции Спирмена. Для оценки точности ИОС в диагностике нарушений легочного газообмена использовался ROC-анализ (ROC – *Receiver Operating Characteristic*). Для каждого параметра ИОС были рассчитаны площади под кривой (AUC), индекс Юдена и оптимальные точки отсечения, основанные на максимизации суммы чувствительности и специфичности для определения пороговых значений параметров ИОС с целью прогнозирования $DL_{CO} < \text{НГН}$. Все тесты считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

Демографическая и клиническая характеристика групп пациентов с нормальной и сниженной ДСЛ представлена в табл. 1. Существенных различий между группами пациентов со сниженной и нормальной величиной ДСЛ по полу, возрасту и антропометрическим характеристикам, а также количеству некурящих и со стажем курения не выявлено. Хотя стаж курения был небольшим, но в группе со сниженной ДСЛ он был статистически значимо выше ($p = 0,024$). Значимая разница наблюдалась в количестве пациентов с бактериовыделением – в группе со сниженной ДСЛ их было больше ($p < 0,001$). Установлена существенно большая частота случаев сниженной ДСЛ у пациентов с распространенным ТЛ.

Значимых различий частоты выявления сниженной и нормальной величины ДСЛ среди пациентов с ограниченными клиническими формами ТЛ – инфильтративным, кавернозным и туберкулемами – не наблюдалось. У пациентов с диссеминированным и фиброзно-кавернозным ТЛ снижение ДСЛ выявлялось значительно чаще ($p < 0,001$).

Параметры, характеризующие ограничение воздушного потока, включая $ОФВ_1$, $ОФВ_1 / \text{ФЖЕЛ}$, $СОС_{25-75}$, были значительно ниже у пациентов со сниженной ДСЛ ($p < 0,05$) (табл. 2). Легочные объемы (ОЕЛ, ЖЕЛ, ВГО, VA) также были статистически значимо ниже в группе пациентов с нарушениями легочного газообмена ($p < 0,05$). Существенной разницы в величине ООЛ не обнаружено, однако показатель PCF был повышен у пациентов со сниженной ДСЛ ($p < 0,05$). Большинство параметров ИОС (Z_{rs5} , R_{rs5} , R_{rs5-20} , AX, F_{res} , ΔX_{rs5}) существенно различались между группами и были статистически значимо выше, а X_{rs5} – ниже у пациентов с нарушениями легочного газообмена ($p < 0,05$). Существенной разницы в отношении R_{rs20} между группами пациентов с нормальной и сниженной ДСЛ не обнаружено ($p > 0,05$).

По результатам корреляционного анализа выявлена умеренная взаимосвязь между DL_{CO} и показателями ИОС: негативная – с частотной зависимостью резистанса R_{rs5-20} , резонансной частотой (F_{res}),

Таблица 1
Характеристика пациентов в группах с нормальной и сниженной диффузионной способностью легких
Table 1
Patient characteristics in groups with normal and decreased diffusing capacity of the lung

Показатели	ДСЛ норма (n = 88)	ДСЛ снижена (n = 205)	p
Пол, n (%):			0,723**
• мужской	37 (42)	80 (39)	
• женский	51 (58)	125 (61)	
Возраст, годы*	33,8 (25,0; 37,5)	31,0 (27,0; 40,0)	0,248***
Рост, м*	1,7 (1,6; 1,8)	1,7 (1,6; 1,8)	0,657***
Масса тела, кг*	62,0 (55,5; 73,0)	60,0 (53,0; 68,0)	0,073***
ИМТ, кг / м ² *	22,4 (19,6; 24,5)	20,9 (18,9; 23,2)	0,078***
Статус курения, n (%):			0,190**
• 0 – не курил	45 (51,1)	84 (40,7)	
• 1 – активный курильщик	27 (30,7)	85 (41,7)	
• 2 – экс-курильщик	16 (18,2)	36 (17,6)	
Индекс курения, пачко-лет*	0,0 (0,0; 4,8)	2,0 (0,0; 6,0)	0,024***
МБТ ⁺ / МБТ ⁻ , n (%)	33 (37,5) / 55 (62,5)	127 (62) / 78 (38)	p < 0,001**
Туберкулез, n (%):			p < 0,001**
• инфильтративный	19 (52,8)	17 (47,2)	
• туберкулемы	30 (47,6)	33 (52,4)	
• кавернозный	21 (45,7)	25 (54,3)	
• диссеминированный	7 (25)	21 (75)	
• фиброзно-кавернозный	11 (9,4)	108 (92,39)	

Примечание: ДСЛ – диффузионная способность легких; ИМТ – индекс массы тела; МБТ – микобактерии туберкулеза; * – данные представлены как медиана (25-й, 75-й перцентили); ** – использовался критерий χ^2 ; *** – использовался U-критерий Манна-Уитни.

Note: *, the data are presented as median (25th, 75th percentiles); **, the χ^2 criterion was used; ***, the Mann – Whitney U-test was used.

Таблица 2
Показатели респираторной функции в группах пациентов с нормальной и сниженной диффузионной способностью легких
Table 2
Pulmonary function tests in groups of patients with normal and decreased diffusing capacity of the lung

Показатели	ДСЛ норма (n = 88)	ДСЛ снижена (n = 205)	p*
ОФВ ₁ , % доп.	100,3 (92,8; 113,5)	78,3 (55,7; 96,3)	< 0,001
ОФВ ₁ / ФЖЕЛ	81,3 (75,5; 89,1)	76,3 (71,6; 82,7)	< 0,001
СОС ₂₅₋₇₅ , % доп.	79,1 (58,1; 98,9)	48,4 (29,9; 74,1)	< 0,001
ОЕЛ, % доп.	113,6 (104,4; 124,0)	101,4 (86,0; 111,8)	< 0,001
ЖЕЛ, % доп.	105,3 (97,2; 114,8)	90,6 (75,3; 104,0)	< 0,001
ООЛ, % доп.	134,6 (117,3; 154,8)	128,9 (110,0; 151,3)	0,129
ВГО, % доп.	118,9 (105,7; 133,5)	109,7 (95,1; 126,6)	0,001
DL _{СО} , % доп.	89,6 (83,7; 96,5)	68,1 (58,9; 74,1)	< 0,001
DL _{СО} / VA, % доп.	87,7 (80,4; 96,7)	77,5 (71,1; 85,3)	< 0,001
PCF, %	12,1 (4,7; 16,7)	15,8 (11,4; 22,2)	< 0,001
VA, % доп.	103,5 (97,5; 109,3)	86,6 (73,7; 97,9)	< 0,001
Zrs5, % доп.	99,6 (85,9; 119,5)	111,1 (93,6; 145,0)	< 0,001
Rrs5, % доп.	96,3 (84,5; 115,3)	105,9 (90,9; 138,5)	0,006
Rrs20, % доп.	113,0 (97,8; 134,0)	118,2 (103,0; 140,9)	0,137
Rrs5–20, кПа / л / с	0,01 (–0,01; 0,03)	0,02 (0,00; 0,10)	0,003

Начало. Окончание табл. 2 см. на стр. 80

Окончание табл. 2. Начало см. на стр. 79

Fres, Гц	9,2 (8,1; 10,8)	10,5 (8,7; 16,1)	< 0,001
AX, кПа / л	0,16 (0,10; 0,26)	0,23 (0,13; 0,6)	< 0,001
Xrs5, кПа	-0,08 (-0,11; -0,06)	-0,10 (-0,16; -0,1)	< 0,001
Δ Xrs5, кПа	0,08 (0,06; 0,10)	0,12 (0,07; 0,2)	< 0,001

Примечание: ОФВ₁ – объем форсированного выдоха за 1-ю секунду; ФЖЕЛ – форсированная жизненная емкость легких; СОС₂₅₋₇₅ – средняя объемная скорость выдоха между 25 и 75 % форсированной жизненной емкости легких; ОЕЛ – общая емкость легких; ЖЕЛ – жизненная емкость легких; ООЛ – остаточный объем легких; ВГО – внутригрудной объем; DL_{CO} – диффузионная способность легких по монооксиду углерода; VA – альвеолярный объем; DL_{CO} / VA – трансфер-коэффициент; PCF (Poorly Communication Fraction) – плохо вентилируемая доля общей емкости легких; Zrs5 – общее дыхательное сопротивление на частоте 5 Гц; Rrs5 – резистанс на частоте 5 Гц; Rrs20 – резистанс на частоте 20 Гц; Rrs5-20 – абсолютная частотная зависимость резистанса; Fres – резонансная частота; AX – площадь под кривой реактанса между 5 Гц и Fres; Xrs5 – реактанс на частоте 5 Гц; Δ Xrs5 – отклонение Xrs5_{доп.}; данные представлены как медиана (25-й, 75-й перцентили); * – использовался U-критерий Манна-Уитни.

Note: The data are presented as median (25th, 75th percentiles); *, Mann – Whitney U-test was used.

отклонением реактивного сопротивления на частоте 5 Гц от должной (Δ Xrs5); позитивная – с Xrs5 (табл. 3, рис. 1). Эти же параметры ИОС, а также общее дыхательное сопротивление на частоте 5 Гц (Zrs5) показали аналогичную по силе взаимосвязь с величиной альвеолярного объема (VA). С трансфер-коэффициентом DL_{CO} / VA взаимосвязь была слабой у всех показателей ИОС. Единственным параметром, показавшим заметную отрицательную взаимосвязь как с DL_{CO}, так и с альвеолярным объемом, была площадь реактанса (AX). Также выявлена умеренная положительная взаимосвязь AX с показателем PCF, характеризующим неравномерность вентиляции.

ROC-анализ проводился для выявления возможностей ИОС в диагностике снижения легочного газообмена. Пороговые значения для каждого параметра ИОС, а также AUC, индекс Юдена и чувствительность и специфичность для каждого порогового значения представлены в табл. 4. Для определения точки отсечения использовалась максимальная сумма чувствительности и специфичности модели. На первом

этапе изучена диагностическая эффективность параметров ИОС в выявлении снижения ДСЛ менее НГН. Резистанс на частоте 20 Гц показал неудовлетворительную прогностическую силу (AUC < 0,6), модели с остальными изученными параметрами резистанса (Rrs5, Rrs5-20), общим дыхательным сопротивлением (Zrs5), реактансом на частоте 5 Гц, резонансной частотой показали среднюю прогностическую силу, но низкую чувствительность (см. табл. 4). Модель с площадью реактанса AX показала хорошую прогностическую силу (AUC = 0,725), но чувствительность также не была высокой (55,1 %).

Для увеличения чувствительности модели рассмотрели снижение DL_{CO} < 75 и 50 %_{доп.}. Пороговые значения площади AX возрастали при снижении легочного газообмена (рис. 2). При снижении DL_{CO} < 75 %_{доп.} пороговое значение AX > 0,30 кПа / л (чувствительность – 57,4 %, специфичность – 80,7 %, индекс Юдена – 0,380, AUC – 0,746; $p < 0,001$). Очень хорошее качество показала модель диагностики снижения DL_{CO} < 50 %_{доп.} с пороговым значением

Таблица 3
Коэффициенты ранговой корреляции по Спирмену между параметрами импульсной осциллометрии и характеристиками легочного газообмена
Table 3
Spearman rank correlation coefficients for impulse oscillometry parameters and pulmonary gas exchange characteristics

Показатели	DL _{CO} , % _{доп.}	DL _{CO} / VA, % _{доп.}	VA, % _{доп.}	PCF, %
Zrs5, кПа / л / с	-0,24*	0,06	-0,28*	0,21*
Zrs5, % _{доп.}	-0,25*	0,10	-0,34*	0,15*
Rrs5, кПа / л / с	-0,21*	0,06	-0,24*	0,19*
Rrs5, % _{доп.}	-0,20*	0,11	-0,29*	0,13*
Rrs20, кПа / л / с	-0,06	0,01	-0,03	0,09
Rrs20, % _{доп.}	-0,05	0,03	-0,07	0,01
Rrs5-20, кПа / л / с	-0,32*	0,12	-0,39*	0,25*
Xrs5, кПа / л / с	0,32*	-0,09	0,43*	-0,21*
Δ Xrs5, кПа / л / с	-0,33*	0,12*	-0,47*	0,14*
Fres, Гц	-0,33*	0,12*	-0,47*	0,26*
AX, кПа / л	-0,51*	-0,03	-0,57*	0,31*

Примечание: * – $p < 0,05$; DL_{CO} – диффузионная способность легких или трансфер-фактор по монооксиду углерода; VA – альвеолярный объем; DL_{CO} / VA – трансфер-коэффициент; PCF (Poorly Communication Fraction) – плохо вентилируемая доля общей емкости легких; Zrs5 – общее дыхательное сопротивление на частоте 5 Гц; Rrs5 – резистанс на частоте 5 Гц; Rrs20 – резистанс на частоте 20 Гц; Rrs5-20 – абсолютная частотная зависимость резистанса; Xrs5 – реактанс на частоте 5 Гц; Δ Xrs5 – отклонение Xrs5_{доп.}; Fres – резонансная частота; AX – площадь под кривой реактанса между 5 Гц и Fres;

Note: *, $p < 0,05$.

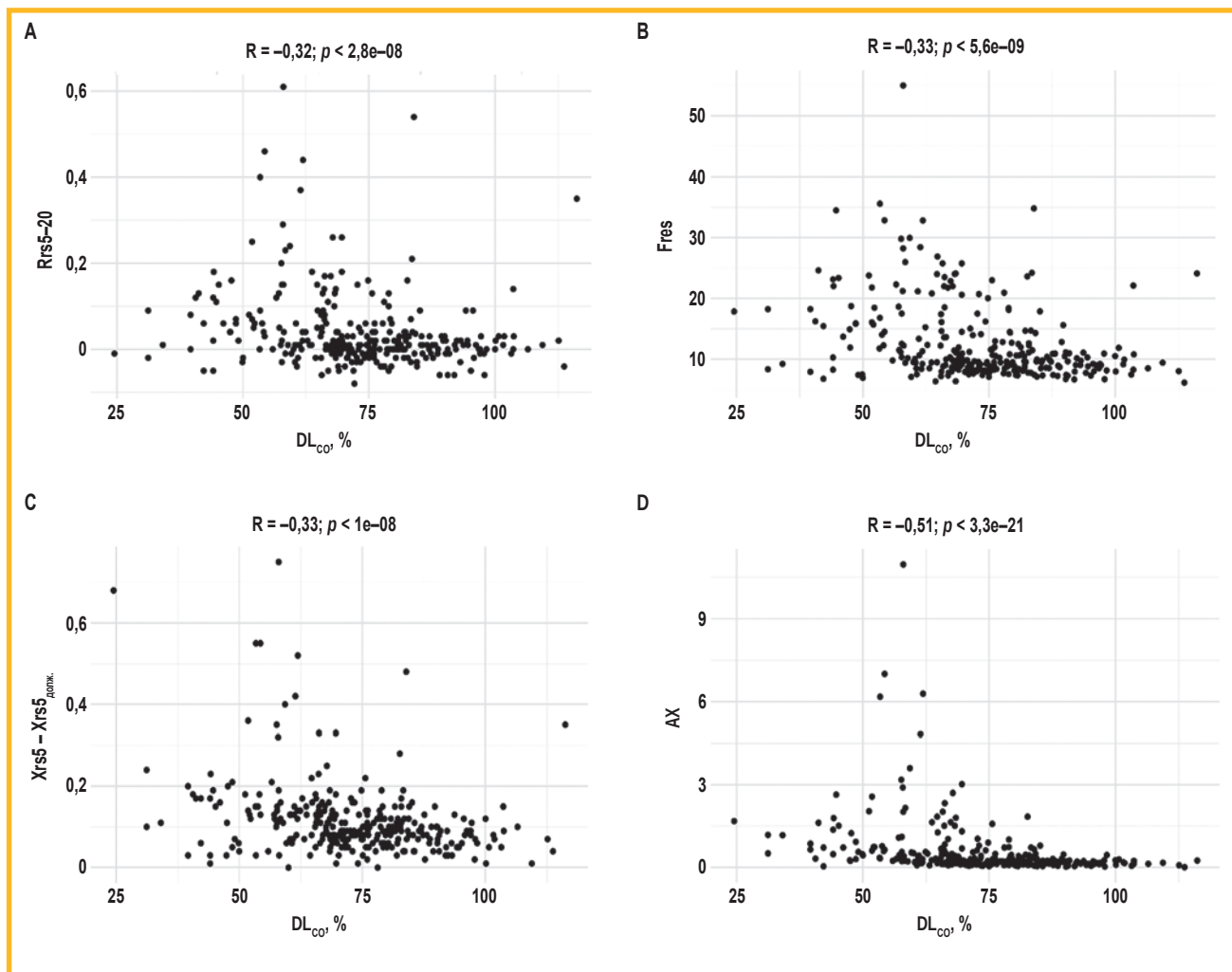


Рис. 1. Корреляционный анализ Спирмена между показателями диффузионной способности легких по монооксиду углерода и импульсной осциллометрии ($p < 0,05$): А – Rrs5–20, кПа / л / с; В – Fres, Гц; С – Δ Xrs5, кПа/л/с; D – AX, кПа / л
Примечание: DL_{CO} – диффузионная способность легких, или трансфер-фактор по монооксиду углерода; Rrs5–20 – абсолютная частотная зависимость резистанса Xrs5 – реактанс на частоте 5 Гц; Fres – резонансная частота; Δ Xrs5 – отклонение Xrs5_{дожж}; AX – площадь под кривой реактанса между 5 Гц и Fres.

Figure 1. Spearman correlation analysis for impulse oscillometry and the diffusing capacity of the lung parameters for carbon monoxide ($p < 0.05$): A – Rrs5–20, kPa/l/s; B – Fres, Hz; C – Δ Xrs5, kPa/l/s; D – AX, kPa/l
Note: DL_{CO} – diffusing capacity of the lung, or transfer factor for carbon monoxide; Rrs5–20 – absolute frequency dependence of resistance Xrs5 – reactance at a frequency of 5 Hz; Fres – resonance frequency; Δ Xrs5 – deviation of Xrs5_{pred}; AX – area under the reactance curve between 5 Hz and Fres.

Таблица 4
Диагностическая эффективность параметров импульсной осциллометрической системы в выявлении снижения диффузионной способности легких (менее нижней границы нормы)

Table 4
Diagnostic efficiency of pulse oscillometric system parameters in detecting decreased diffusing capacity of the lung (less than the lower limit of normal)

Параметры ИОС	Пороговое значение	Чувствительность	Специфичность	p	Индекс Юдена	AUC
Zrs5, кПа / л / с	> 0,34	54,2	65,9	< 0,001	0,201	0,626
Rrs5, кПа / л / с	> 0,45	24,9	94,3	0,002	0,192	0,607
Rrs5–20, кПа / л / с	> 0,036	40,0	86,4	0,001	0,264	0,610
Xrs5, кПа / л / с	$\leq (-0,13)$	39,5	86,4	< 0,001	0,259	0,642
Δ Xrs5, кПа / л / с	> 0,10	52,2	77,3	< 0,001	0,295	0,643
Fres, Гц	> 11,1	46,3	84,1	< 0,001	0,304	0,644
AX, кПа / л	> 0,29	55,1	81,8	< 0,001	0,369	0,725

Примечание: ИОС – импульсная осциллометрическая система; AUC (area under the curve) – площадь под кривой; Zrs5 – общее дыхательное сопротивление на частоте 5 Гц; Rrs5 – резистанс на частоте 5 Гц; Rrs5–20 – абсолютная частотная зависимость резистанса Xrs5 – реактанс на частоте 5 Гц; Δ Xrs5 – отклонение Xrs5_{дожж}; Fres – резонансная частота; AX – площадь под кривой реактанса между 5 Гц и Fres.

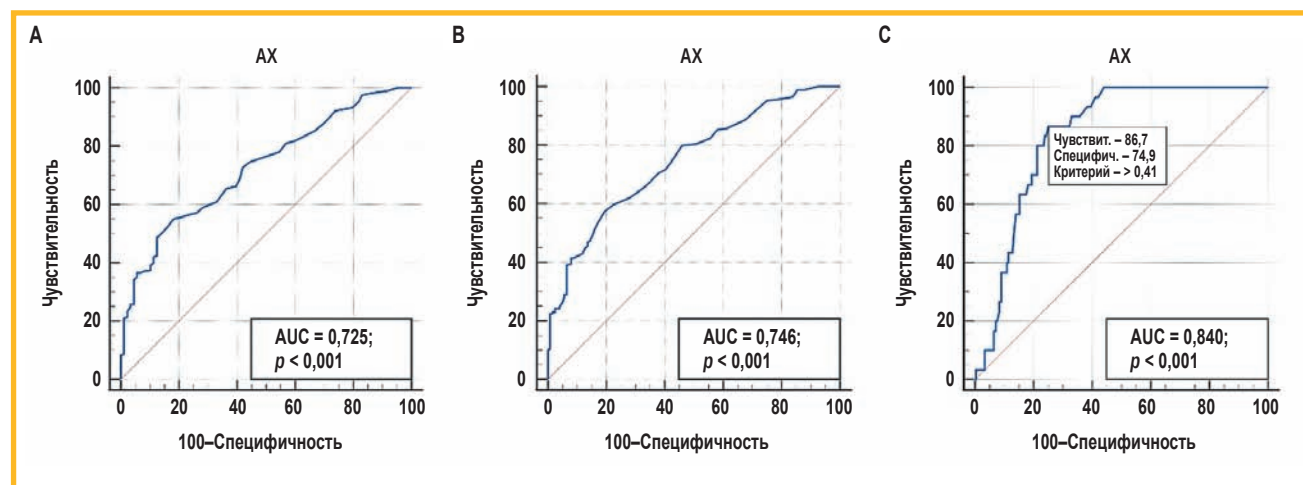


Рис. 2. ROC-кривые площади реактанса AX в диагностике снижения диффузионной способности легких по монооксиду углерода (DL_{CO}): А – $DL_{CO} <$ нижней границы нормы, пороговое значение AX $> 0,29$ кПа / л (AUC = 0,725; $p < 0,0001$); В – $DL_{CO} < 75\%$ долж., пороговое значение AX $> 0,30$ кПа / л (AUC = 0,746; $p < 0,0001$); С – $DL_{CO} < 50\%$ долж., пороговое значение AX $> 0,41$ кПа / л (AUC = 0,840; $p = 0,01$)

Примечание: ROC-кривые (Receiver Operating Characteristic) – рабочая характеристика приемника; DL_{CO} – диффузионная способность легких, или трансфер-фактор по монооксиду углерода; AX – площадь под кривой реактанса между 5 Гц и Fres; AUC (Area Under The Curve) – площадь под кривой; Fres – резонансная частота.

Figure 2. ROC-curves of the reactance area of AX in the diagnosis of decreased diffusing capacity of the lung for carbon monoxide (DL_{CO}): А – $DL_{CO} <$ lower limit of normal, threshold value of AX > 0.29 kPa/l (AUC = 0.725; $p < 0.0001$); В – $DL_{CO} < 75\%$ pred., threshold value of AX > 0.30 kPa/l (AUC = 0.746; $p < 0.0001$); С – $DL_{CO} < 50\%$ pred., threshold value of AX > 0.41 kPa/l (AUC = 0.840; $p = 0.01$)

Note: ROC-curves – receiver operating characteristic; DL_{CO} – diffusing capacity of the lung, or transfer factor for carbon monoxide; AX – area under the reactance curve between 5 Hz and Fres; AUC – area under the curve; Fres – resonant frequency.

AX $> 0,41$ кПа / л (чувствительность – 86,7 %, специфичность – 74,9 %, индекс Юдена – 0,616, AUC_{долж.} – 0,840; $p < 0,001$).

Обсуждение

Изучена взаимосвязь параметров импульсной осциллометрии с ДСЛ у пациентов с ТЛ. Исследование DL_{CO} широко используется в лабораториях по изучению функции легких. Однако этот показатель не определяется однозначно процессом диффузии, поэтому в ряде стран считается более уместным термин «трансфер-фактор», или фактор переноса CO.

Учитывая, что на величину DL_{CO} , кроме состояния альвеоларно-капиллярной мембраны, влияет площадь газообмена и равномерность вентилиционно-перфузионных отношений, обеспечивающая градиент давления для газов, проведен корреляционный анализ параметров ИОС с трансфер-фактором DL_{CO} , трансфер-коэффициентом DL_{CO} / VA , VA и индексом PCF. Показатель гетерогенности сопротивления (Rrs5–20) был негативно связан с величиной DL_{CO} и VA. Параметры, характеризующие изменение реактивного сопротивления (Fres и AX), также показали негативную, а величина Xrs5 – позитивную связь с величиной DL_{CO} и VA. Кроме того, площадь реактанса AX показала статистически значимую позитивную взаимосвязь с индексом неравномерности вентилиации PCF. Трансфер-коэффициент, который преимущественно отражает внутрипаренхиматозное ограничение легочного газообмена [34], не показал значимой взаимосвязи с параметрами ИОС.

Анализ корреляции ДСЛ и параметров ИОС проводился при различной бронхолегочной патологии.

В исследовании О.И.Савушкиной и соавт. у больных с рестриктивной патологией выявлена обратная корреляционная зависимость ДСЛ от частотной зависимости Rrs (Rrs5–20), отклонения Xrs на частоте 5 Гц_{долж.} ($\Delta Xrs5$) и Fres [13]. Японскими исследователями T.Ishikawa et al. выявлена другая закономерность у больных идиопатическим легочным фиброзом – значимая корреляция ДСЛ: положительная – с Xrs5, отрицательная – с Fres и AX, в то время как статистически значимой взаимосвязи с частотной зависимостью резистанса не выявлено [19]. В исследовании Y.Yamamoto et al. положительная корреляция Xrs5 и ДСЛ выявлена только у пациентов с сочетанием фиброза легких и эмфиземы, но не у пациентов с идиопатическим легочным фиброзом [16].

При анализе исследований с обструктивной патологией корреляция параметров ИОС с показателями ДСЛ зависела от тяжести обструкции и нозологии. По данным О.И.Савушкиной и соавт., у больных бронхиальной астмой, а также при легкой бронхиальной обструкции значимые корреляционные связи параметров ИОС с DL_{CO} не установлены [6, 7]. При тяжелой обструкции выявлена умеренная прямая корреляционная зависимость показателей DL_{CO} с Rrs20 [8]. В исследовании D.Duman et al. установлена обратная зависимость DL_{CO} с сопротивлением на частоте 5 Гц (Rrs5), неравномерностью сопротивления (Rrs5–20) и AX [17]. По данным других исследований также обнаружена негативная взаимосвязь DL_{CO} с Rrs5–20 и резонансной частотой и положительная – с Rrs5 [14].

Таким образом, при различных синдромах вентилиционных нарушений наблюдались разные виды взаимосвязи ДСЛ и параметров ИОС. При рестрик-

тивной патологии прослеживалась взаимосвязь DL_{CO} преимущественно с реактивным сопротивлением. Интерстициальная ткань легких, эластичная паренхима, грудная стенка, а также дистальные дыхательные пути с воздухом обладают высокими свойствами поглощения энергии, особенно для низкочастотных волн. На более высоких частотах в центральных дыхательных путях преобладает инерционность. Следовательно, интерпретация реактивного сопротивления будет зависеть от частоты колебаний. Если преобладают фиброзная ткань или гиперинфляция, то накопление емкостной энергии будет нарушено, что приведет к более отрицательному реактивному сопротивлению на более низких частотах колебаний, повышению резонансной частоты и площади реактанса.

При обструктивной патологии взаимосвязь DL_{CO} наблюдалась и с реактивным сопротивлением, и с сопротивлением на частоте 5 Гц, и показателем неравномерности сопротивления ($Rrs5-20$). Значение $Rrs5$ определяет общее аэродинамическое сопротивление дыхательных путей, тогда как $Rrs20$ характеризует сопротивление в больших по размеру, т. н. центральных дыхательных путях. Разница между этими двумя значениями ($Rrs5-20$) отражает вклад сопротивления малых дыхательных путей в общее сопротивление дыханию. Гетерогенность паренхимы легких, грудной стенки и дыхательных путей также оказывает некоторое влияние на значения Rrs .

У пациентов с ТЛ наблюдаются различные морфологические изменения легочной ткани, которые приводят к фиброзу, и к обструкции с формированием гиперинфляции легких. Эти изменения, несомненно, оказывают влияние на способность легких к газообмену. Показано, что импульсная осциллометрия может быть полезна для прогнозирования нарушения ДСЛ у пациентов с ТЛ. Параметром ИОС с наиболее оптимальными показателями прогнозирования снижения ДСЛ оказалась площадь реактанса AX . Изменение AX было взаимосвязано как с величиной DL_{CO} , так и с изменением VA и индексом PCF . Модель диагностики снижения $DL_{CO} < 50\%$ дож. показала очень хорошее качество и достаточно высокую чувствительность. При значении $AX > 0,41$ кПа/л высока вероятность значительного снижения ДСЛ, что требует при необходимости подтверждения соответствующим исследованием.

Данное исследование имеет некоторые ограничения — оно являлось одноцентровым ретроспективным, а объем выборки был относительно небольшим. Таким образом, для проверки результатов необходимы проспективные исследования, включающие большее число субъектов и другие нозологии.

Заключение

ДСЛ у больных ТЛ коррелирует с изменением общего дыхательного сопротивления и его компонентов. Включение импульсной осциллометрии в рутинную клиническую практику дало бы важные преимущества, включая более подробную информацию о различии между сопротивлением и реактивностью на разных уровнях дыхательных путей.

Литература

- Smith H., Reinhold P., Goldman M. Forced oscillation technique and impulse oscillometry. *Eur. Respir. Monogr.* 2005; 31 (31): 72–105. DOI: 10.1183/1025448x.00031005.
- Кирихина Л.Д., Черняк А.В. Осциллометрия: клиническая значимость и применение. *Пульмонология.* 2023; 33 (6): 798–808. DOI: 10.18093/0869-0189-2023-33-6-798-808.
- Bednarek M., Grabicki M., Piorunek T., Batura-Gabryel H. [Current place of impulse oscillometry in the assessment of pulmonary diseases]. *Respir. Med.* 2020; 170: 105952. DOI: 10.1016/j.rmed.2020.105952.
- Brashier B., Salvi S. Measuring lung function using sound waves: role of the forced oscillation technique and impulse oscillometry system. *Breathe (Sheff.)*. 2015; 11 (1): 57–65. DOI: 10.1183/20734735.020514.
- Yamagami H., Tanaka A., Kishino Y. et al. Association between respiratory impedance measured by forced oscillation technique and exacerbations in patients with COPD. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2017; 13: 79–89. DOI: 10.2147/COPD.S146669.
- Савушкина О.И., Черняк А.В., Каменева М.Ю. и др. Возможности импульсной осциллометрии в диагностике обструкции дыхательных путей легкой степени выраженности. *Пульмонология.* 2018; 28 (4): 391–398. DOI: 10.18093/0869-0189-2018-28-4-391-398.
- Савушкина О.И., Крюков Е.В., Черняк А.В. и др. Применение импульсной осциллометрии у больных бронхиальной астмой. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания.* 2019; (73): 34–41. DOI: 10.36604/1998-5029-2019-73-34-41.
- Савушкина О.И., Черняк А.В., Крюков Е.В. и др. Диагностика обструктивных нарушений механики дыхания тяжелой степени выраженности методом импульсной осциллометрии. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания.* 2019; (72): 39–46. DOI: 10.12737/article_5d09e408a83da5.52226087.
- Леонтьева Н.М., Демко И.В., Собко Е.А. и др. Метод импульсной осциллометрии в диагностике ранних изменений функционального состояния респираторной системы у больных бронхиальной астмой легкого течения. *Архивъ внутренней медицины.* 2019; 9 (3): 213–221. DOI: 10.20514/2226-6704-2019-9-3-213-221.
- Wei X., Shi Z., Cui Y et al. Impulse oscillometry system as an alternative diagnostic method for chronic obstructive pulmonary disease. *Medicine (Baltimore)*. 2017; 96 (46): e8543. DOI: 10.1097/MD.00000000000008543.
- Lee H.J., Kim H.S., Yoon J.S. Impulse oscillometry system for assessing small airway dysfunction in pediatric bronchiolitis obliterans; association with conventional pulmonary function tests. *PloS One*. 2023; 18 (2): e0280309. DOI: 10.1371/journal.pone.0280309.
- Кирихина Л.Д., Каменева М.Ю., Новикова Л.Н. Возможность импульсной осциллометрии в диагностике рестриктивного варианта вентиляционных нарушений. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2017; 59 (5): 136–141. DOI: 10.23670/IRJ.2017.59.032.
- Савушкина О.И., Черняк А.В., Каменева М.Ю. и др. Информативность импульсной осциллометрии в выявлении вентиляционных нарушений рестриктивного типа. *Бюллетень физиологии и патологии дыхания.* 2018; (67): 8–16. DOI: 10.12737/article_5a9f258fe6d932.79474351.
- Takeichi N., Yamazaki H., Fujimoto K. Comparison of impedance measured by the forced oscillation technique and pulmonary functions, including static lung compliance, in obstructive and interstitial lung disease. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2019; 14: 1109–1118. DOI: 10.2147/COPD.S198030.
- Mori Y., Nishikiori H., Chiba H. et al. Respiratory reactance in forced oscillation technique reflects disease stage and predicts lung physiology deterioration in idiopathic pulmonary fibrosis. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2020; 275: 103386. DOI: 10.1016/j.resp.2020.103386.
- Yamamoto Y., Hirata H., Shiroyama T. et al. Respiratory impedance is associated with ventilation and diffusing capacity in patients with idiopathic pulmonary fibrosis combined with emphysema. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2022; 1 (17): 1495–1506. DOI: 10.2147/COPD.S368162.
- Duman D., Taştı Ö.F., Merve Tepetam F. Assessment of small airway dysfunction by impulse oscillometry (IOS) in COPD and IPF patients. *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.* 2023; 27 (7): 3033–3044. DOI: 10.26355/eurrev_202304_31937.

18. Matesanz-López C., Raboso-Moreno B., Saldaña-Pérez L.E. et al. Is lung function measured by oscillometry useful in interstitial lung diseases? *Open Respir. Arch.* 2023; 6 (1): 100278. DOI: 10.1016/j.opresp.2023.100278.
19. Ishikawa T., Nishikiori H., Mori Y. et al. The impact of respiratory reactance in oscillometry on survival in patients with idiopathic pulmonary fibrosis. *BMC Pulm. Med.* 2024; 24 (1): 10. DOI: 10.1186/s12890-023-02776-y.
20. Oostveen E., MacLeod D., Lorino H. et al. The forced oscillation technique in clinical practice: methodology, recommendations and future developments. *Eur. Respir. J.* 2003; 22 (6): 1026–1041. DOI: 10.1183/09031936.03.00089403.
21. Bickel S., Popler J., Lesnick B., Eid N. Impulse oscillometry: interpretation and practical applications. *Chest.* 2014; 146 (3): 841–847. DOI: 10.1378/chest.13-1875.
22. Чушкин М.И., Попова Л.А., Шергина Е.А. и др. Вентиляционная функция легких и качество жизни пациентов после перенесенного туберкулеза легких. *Медицинский альянс.* 2021; 9 (4): 37–44. DOI: 10.36422/23076348-2021-9-4-37-44.
23. Володич О.С., Кириухина Л.Д., Денисова Н.В. и др. Осцилляционная механика аппарата вентиляции в раннем послеоперационном периоде у пациентов, оперированных по поводу туберкулеза легких. *Медицинский альянс.* 2019; 7 (4): 30–38. Доступно на: <https://med-alyans.spbniif.ru/index.php/Hahn/article/view/619>
24. Кириухина Л.Д., Володич О.С., Денисова Н.В. и др. Импульсная осциллометрия в диагностике обструктивных вентиляционных нарушений у больных туберкулезом легких. *Туберкулез и болезни легких.* 2019; 97 (11): 34–40. DOI: 10.21292/2075-1230-2019-97-11-34-40.
25. Жукова Е.М., Вохминова Л.Г. Метод форсированных осцилляций в диагностике обструктивных вентиляционных нарушений у больных туберкулезом легких. *Туберкулез и болезни легких.* 2021; 99 (11): 43–46. DOI: 10.21292/2075-1230-2021-99-11-43-46.
26. Graham B.L., Brusasco V., Burgos F. et al. 2017 ERS/ATS standards for single-breath carbon monoxide uptake in the lung. *Eur. Respir. J.* 2017; 49 (1): 1600016. DOI: 10.1183/13993003.00016-2016.
27. Graham B.L., Steenbruggen I., Miller M. R. et al. Standardization of spirometry 2019 update an official American Thoracic Society and European Respiratory Society Technical Statement. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2019; 200 (8): e70–88. DOI: 10.1164/rccm.201908-1590ST.
28. Wanger J., Clausen J.L., Coates A. et al. Standardisation of the measurement of lung volumes. *Eur. Respir. J.* 2005; 26 (3): 511–522. DOI: 10.1183/09031936.05.00035005.
29. Берестень Н.Ф., Сандрикова В.А., Федоровой С.И. Национальное руководство. Функциональная диагностика. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2019: 566–645.
30. Neder J.A., O'Donnell C.D., Cory J. et al. Ventilation distribution heterogeneity at rest as a marker of exercise impairment in mild-to-advanced COPD. *COPD.* 2015; 12 (3): 249–256. DOI: 10.3109/15412555.2014.948997.
31. Quanjer P.H., Tammeling G.J., Cotes J.E. et al. Report working party standardization of lung function tests, European Community for Steel and Coal: Official statement of the European Respiratory Society. *Eur. Respir. J.* 1993; 16: 5–40. DOI: 10.1183/09041950.005s1693.
32. King G.G., Bates J., Berger K.I. et al. Technical standards for respiratory oscillometry. *Eur. Respir. J.* 2020; 55 (2): 1900753. DOI: 10.1183/13993003.00753-2019.
33. Vogel J., Smidt U. Impulse oscillometry: Analysis of lung mechanics in general practice and the clinic, epidemiological and experimental research. Frankfurt am Main: pmi-Verl.-Gruppe; 1994.
34. Neder J.A., Marillier M., Bernard A.C., et al. Transfer coefficient of the lung for carbon monoxide and the accessible alveolar volume: clinically useful if used wisely. *Breathe (Sheff.).* 2019; 15 (1): 69–76. DOI: 10.1183/20734735.0345-2018.
35. Кириухина Л.Д., Чернык А.В. [Oscillometry: clinical significance and applications]. *Pul'monologiya.* 2023; 33 (6): 798–808. DOI: 10.18093/0869-0189-2023-33-6-798-808 (in Russian).
36. Bednarek M., Grabicki M., Piorunek T., Batura-Gabryel H. [Current place of impulse oscillometry in the assessment of pulmonary diseases]. *Respir. Med.* 2020; 170: 105952. DOI: 10.1016/j.rmed.2020.105952.
37. Brashier B., Salvi S. Measuring lung function using sound waves: role of the forced oscillation technique and impulse oscillometry system. *Breathe (Sheff.).* 2015; 11 (1): 57–65. DOI: 10.1183/20734735.020514.
38. Yamagami H., Tanaka A., Kishino Y. et al. Association between respiratory impedance measured by forced oscillation technique and exacerbations in patients with COPD. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2017; 13: 79–89. DOI: 10.2147/COPD.S146669.
39. Savushkina O.I., Chernyak A.V., Kameneva M.Yu. et al. [A role of impulse oscillometry for diagnosis of mild bronchial obstruction]. *Pul'monologiya.* 2018; 28 (4): 391–398. DOI: 10.18093/0869-0189-2018-28-4-391-398 (in Russian).
40. Savushkina O.I., Kryukov E.V., Cherniak A.V. et al. [The use of impulse oscillometry in patients with asthma]. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya.* 2019; (73): 34–41. DOI: 10.36604/1998-5029-2019-73-34-41 (in Russian).
41. Savushkina O.I., Cherniak A.V., Kryukov E.V. et al. [The diagnosis of severe obstructive respiratory mechanics defects by impulse oscillometry system]. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya.* 2019; (72): 39–46. DOI: 10.12737/article_5d09e408a83da5.52226087 (in Russian).
42. Leontieva N.M., Demko I.V., Sobko E.A. et al. [Impulse oscillometry for diagnosis of early changes in the respiratory system functional state in patients with mild asthma]. *Arkhiv' vnutrenney meditsiny.* 2019; 9 (3): 213–221. DOI: 10.20514/2226-6704-2019-9-3-213-221 (in Russian).
43. Wei X., Shi Z., Cui Y et al. Impulse oscillometry system as an alternative diagnostic method for chronic obstructive pulmonary disease. *Medicine (Baltimore).* 2017; 96 (46): e8543. DOI: 10.1097/MD.00000000000008543.
44. Lee H.J., Kim H.S., Yoon J.S. Impulse oscillometry system for assessing small airway dysfunction in pediatric bronchiolitis obliterans; association with conventional pulmonary function tests. *PloS One.* 2023; 18 (2): e0280309. DOI: 10.1371/journal.pone.0280309.
45. Кириухина Л.Д., Каменева М.Ю., Новикова Л.Н. [Possibilities of pulsed oscillometry in diagnostics of a restrictive version of ventilation disorders]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal.* 2017; 59 (5): 136–141. DOI: 10.23670/IRJ.2017.59.032 (in Russian).
46. Savushkina O.I., Cherniak A.V., Kameneva M.Yu. et al. [Informativeness of impulse oscillometry in the detection of restrictive type ventilation disorders]. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya.* 2018; (67): 8–16. DOI: 10.12737/article_5a9f258fe6d932.79474351 (in Russian).
47. Takeichi N., Yamazaki H., Fujimoto K. Comparison of impedance measured by the forced oscillation technique and pulmonary functions, including static lung compliance, in obstructive and interstitial lung disease. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2019; 14: 1109–1118. DOI: 10.2147/COPD.S198030.
48. Mori Y., Nishikiori H., Chiba H. et al. Respiratory reactance in forced oscillation technique reflects disease stage and predicts lung physiology deterioration in idiopathic pulmonary fibrosis. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2020; 275: 103386. DOI: 10.1016/j.resp.2020.103386.
49. Yamamoto Y., Hirata H., Shirokawa T. et al. Respiratory impedance is associated with ventilation and diffusing capacity in patients with idiopathic pulmonary fibrosis combined with emphysema. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2022; 1 (17): 1495–1506. DOI: 10.2147/COPD.S368162.
50. Duman D., Taştı Ö.F., Merve Tepetam F. Assessment of small airway dysfunction by impulse oscillometry (IOS) in COPD and IPF patients. *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.* 2023; 27 (7): 3033–3044. DOI: 10.26355/eurrev_202304_31937.
51. Matesanz-López C., Raboso-Moreno B., Saldaña-Pérez L.E. et al. Is lung function measured by oscillometry useful in interstitial lung diseases? *Open Respir. Arch.* 2023; 6 (1): 100278. DOI: 10.1016/j.opresp.2023.100278.
52. Ishikawa T., Nishikiori H., Mori Y. et al. The impact of respiratory reactance in oscillometry on survival in patients with idiopathic pulmonary fibrosis. *BMC Pulm. Med.* 2024; 24 (1): 10. DOI: 10.1186/s12890-023-02776-y.

Поступила: 14.08.24
Принята к печати: 14.11.24

References

1. Smith H., Reinhold P., Goldman M. Forced oscillation technique and impulse oscillometry. *Eur. Respir. Monogr.* 2005; 31 (31): 72–105. DOI: 10.1183/1025448x.00031005.

20. Oostveen E., MacLeod D., Lorino H. et al. The forced oscillation technique in clinical practice: methodology, recommendations and future developments. *Eur. Respir. J.* 2003; 22 (6): 1026–1041. DOI: 10.1183/09031936.03.00089403.
21. Bickel S., Popler J., Lesnick B., Eid N. Impulse oscillometry: interpretation and practical applications. *Chest.* 2014; 146 (3): 841–847. DOI: 10.1378/chest.13-1875.
22. Chushkin M., Popova L., Shergina E. et al. [Ventilation function of lung and quality of life after cured pulmonary tuberculosis]. *Meditsinskiy al'yans.* 2021; 9 (4): 37–44. DOI: 10.36422/23076348-2021-9-4-37-44 (in Russian).
23. Volodich O., Kiryukhina L., Denisova N. et al. [The impulse oscillometry technique in patients with pulmonary tuberculosis in pre- and post-operative surgical treatment]. *Meditsinskiy al'yans.* 2019; 7 (4): 30–38. Available at: <https://med-alyans.spbniif.ru/index.php/Hahn/article/view/619> (in Russian).
24. Kiryukhina L.D., Volodich O.S., Denisova N.V. et al. [Impulse oscillometry in the diagnosis of obstructive ventilation disorders in pulmonary tuberculosis patients]. *Tuberkulez i bolezni legkikh.* 2019; 97 (11): 34–40. DOI: 10.21292/2075-1230-2019-97-11-34-40 (in Russian).
25. Zhukova E.M., Vokhminova L.G. [The forced oscillation test in the diagnosis of obstructive ventilation disorders in pulmonary tuberculosis patients]. *Tuberkulez i bolezni legkikh.* 2021; 99 (11): 43–46. DOI: 10.21292/2075-1230-2021-99-11-43-46 (in Russian).
26. Graham B.L., Brusasco V., Burgos F. et al. 2017 ERS/ATS standards for single-breath carbon monoxide uptake in the lung. *Eur. Respir. J.* 2017; 49 (1): 1600016. DOI: 10.1183/13993003.00016-2016.
27. Graham B.L., Steenbruggen I., Miller M. R. et al. Standardization of spirometry 2019 update an official American Thoracic Society and European Respiratory Society Technical Statement. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2019; 200 (8): e70–88. DOI: 10.1164/rccm.201908-1590ST.
28. Wanger J., Clausen J.L., Coates A. et al. Standardisation of the measurement of lung volumes. *Eur. Respir. J.* 2005; 26 (3): 511–522. DOI: 10.1183/09031936.05.00035005.
29. Beresten N.F., Sandrikov V.A., Fedorova S.I. [Functional diagnostics: National recommendations]. Moscow: GEOTAR-Media; 2019: 566–645 (in Russian).
30. Neder J.A., O'Donnell C.D., Cory J. et al. Ventilation distribution heterogeneity at rest as a marker of exercise impairment in mild-to-advanced COPD. *COPD.* 2015; 12 (3): 249–256. DOI: 10.3109/15412555.2014.948997.
31. Quanjer P.H., Tammeling G.J., Cotes J.E. et al. Report working party standardization of lung function tests, European Community for Steel and Coal: Official statement of the European Respiratory Society. *Eur. Respir. J.* 1993; 16: 5–40. DOI: 10.1183/09041950.005s1693.
32. King G.G., Bates J., Berger K.I. et al. Technical standards for respiratory oscillometry. *Eur. Respir. J.* 2020; 55 (2): 1900753. DOI: 10.1183/13993003.00753-2019.
33. Vogel J., Smidt U. Impulse oscillometry: Analysis of lung mechanics in general practice and the clinic, epidemiological and experimental research. Frankfurt am Main: pmi-Verl.-Gruppe; 1994.
34. Neder J.A., Marillier M., Bernard A.C., et al. Transfer coefficient of the lung for carbon monoxide and the accessible alveolar volume: clinically useful if used wisely. *Breathe (Sheff.).* 2019; 15 (1): 69–76. DOI: 10.1183/20734735.0345-2018.

Received: August 14, 2024

Accepted for publication: April 23, 2024

Информация об авторах / Authors Information

Кирюхина Лариса Дмитриевна — к. м. н., заведующая отделением функциональной и ультразвуковой диагностики, ведущий научный сотрудник лаборатории патофизиологии дыхания Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский институт пульмонологии» Федерального медико-биологического агентства; руководитель научно-исследовательской лаборатории функциональных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (495) 410-39-00; e-mail: kiryuhina_larisa@mail.ru (SPIN: 7446-4116; Author ID: 342739; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6550-817X>)

Larisa D. Kiryukhina, Candidate of Medicine, Head of the Department of Functional and Ultrasound Diagnostics, Leading Researcher, Laboratory of Pathophysiology of Respiration, Federal State Budgetary Institution "Pulmonology Scientific Research Institute" under Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation; Head of the Research Laboratory of Functional Research, Russian Federation Healthcare Ministry Saint-Petersburg State Phthisiopulmonology Research Institute; tel.: (495) 410-39-00; e-mail: kiryuhina_larisa@mail.ru (SPIN: 7446-4116; Author ID: 342739; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6550-817X>)

Кокорина Елена Васильевна — врач отделения функциональной диагностики Федерального государственного бюджетного учреждения

«Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (812) 775-75-50; e-mail: alae.majoris@yandex.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0588-5288>)

Elena V. Kokorina, Physician, Functional Diagnostics Department, Russian Federation Healthcare Ministry Saint-Petersburg State Phthisiopulmonology Research Institute; tel.: (812) 775-75-50; e-mail: alae.majoris@yandex.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0588-5288>)

Яблонский Петр Казимирович — д. м. н., профессор, директор Федерального государственного бюджетного учреждения «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации; проректор по медицинской деятельности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Правительства Российской Федерации; тел.: (812) 775-75-50; e-mail: piotr_yablonskii@mail.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4385-9643>)

Petr K. Yablonskiy, Doctor of Medicine, Professor, Head of Russian Federation Healthcare Ministry Saint-Petersburg State Phthisiopulmonology Research Institute; Vice-Rector for Medicine, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University", Government of the Russian Federation; tel.: (812) 775-75-50; e-mail: piotr_yablonskii@mail.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4385-9643>)

Участие авторов

Кирюхина Л.Д. — идея написания статьи, сбор и обработка материала, написание текста

Кокорина Е.В. — сбор и обработка материала, написание текста

Яблонский П.К. — руководство при подготовке и написании статьи, редактирование текста

Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования, подготовку статьи, анализ и интерпретацию результатов, прочли и одобрили финальную версию до публикации, несут ответственность за целостность всех частей статьи.

Authors Contribution

Kiryukhina L.D. — idea of the article, collecting and processing the material, writing the text

Kokorina E.V. — collecting and processing the material, writing the text

Yablonskiy P.K. — guidance in the preparation and writing of the article, editing the text

All authors have made a significant contribution to the study, preparation of the article, analysis and interpretation of the results, read and approved the final version before publication, and are responsible for the integrity of all parts of the article.