

Осциллометрия: клиническая значимость и применение

Л.Д.Кириухина^{1,2}, А.В.Черняк^{1,3} ✉

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 Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Городская клиническая больница имени Д.Д.Плетнева Департамента здравоохранения города Москвы»: 105077, Россия, Москва, ул. 11-я Парковая, 32

Резюме

Осциллометрия (метод форсированных осцилляций) достаточно широко представлена в Российской Федерации. Это простой неинвазивный метод функциональной диагностики, имеющий уникальные преимущества в ситуациях, когда спирометрия и другие тесты, при помощи которых оценивается функция легких, не подходят, например, у детей младшего возраста, ослабленных больных, при физических и когнитивных препятствиях для выполнения тестов, при проведении которых требуются усилия и координация. **Целью** работы явились анализ данных научной литературы и собственные результаты, а также оценка значимости и области применения осциллометрии в клинической практике. Для этого рассмотрены физиологические принципы осциллометрии и основы интерпретации результатов исследования, представлено описание известных в настоящее время фактов об осциллометрии как чувствительном диагностическом инструменте оценки сопротивления дыхательных путей (ДП), чувствительности при бронхолитических и бронхопровокационных тестах, реакции на медикаментозную терапию, особенно при бронхиальной астме и хронической обструктивной болезни легких. Являясь полезным инструментом для диагностики обструктивного варианта вентиляционных нарушений, осциллометрия используется в качестве дополнительного теста при спирометрии для уточнения фенотипов заболеваний с поражением мелких ДП. Однако, несмотря на широкие перспективы осциллометрии в качестве полезного диагностического инструмента, при рестриктивной патологии необходимы дополнительные доказательства клинической полезности метода. **Заключение.** Осциллометрия считается дополнительным, а иногда и альтернативным спирометрии и бронходилатационному тесту методом, поскольку она хорошо стандартизирована, результаты тестирования обладают высокой повторяемостью, при проведении исследования от пациента не требуется максимальных усилий, процедура проводится при спокойном дыхании.

Ключевые слова: осциллометрия, метод форсированных осцилляций, функция системы дыхания, функциональная диагностика.

Конфликт интересов. Конфликт интересов авторами не заявлен.

Финансирование. Спонсорская поддержка исследования отсутствовала.

Благодарности. Статья опубликована при поддержке компании ФОРМЕД.

© Кириухина Л.Д., Черняк А.В., 2023

Для цитирования: Кириухина 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

Oscillometry: clinical significance and applications

Larisa D. Kiryukhina^{1,2}, Alexander V. Chernyak^{1,3} ✉

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

³ State Budgetary Healthcare Institution of the City of Moscow “City Clinical Hospital named after D.D.Pletnev of Moscow Department of Health”: ul. Odinnadstaya Parkovaya 32, Moscow, 105077, Russia

Abstract

Oscillometry (the forced oscillation technique) is widely used in the Russian Federation. It is a simple, noninvasive functional diagnostic test that offers unique advantages in cases where spirometry and other pulmonary function tests are not appropriate, such as in young children, debilitated patients, or patients with physical and cognitive barriers to performing tests that require effort and coordination. **The aim** of this study was to analyze scientific literature data and our own results and to evaluate the significance and applications of oscillometry in clinical practice. The review examined the physiological principles of oscillometry and the basis for interpreting the results. Oscillometry is now recognized as a sensitive diagnostic tool for assessing airway resistance. This article describes sensitivity of the method for bronchodilation and bronchoprovocation tests, as well as its response to drug treatment, especially in asthma and chronic obstructive pulmonary disease. Oscillometry is a useful tool for diagnosing obstructive ventilation disorders. It should be used as an addition to spirometry to clarify phenotypes of small airways diseases. However, despite its great promise as a useful diagnostic tool, further evidence of its clinical utility in restrictive conditions is needed. **Conclusion.** Thus, oscillometry can be considered an addition and sometimes an alternative to spirometry and bronchodilation test, since it is well standardized. The test results are highly reproducible, the study does not require maximum effort, and the test is carried out during spontaneous tidal breathing.

Key words: oscillometry, forced oscillation technique, lung function, functional diagnostics.

Conflict of interests. No conflict of interest has been declared by the authors.

Funding. The study was not sponsored.

Acknowledgments. The article was posted with the support of FORMED.

© Kiryukhina L.D., Chernyak A.V., 2023

For citation: Kiryukhina L.D., Chernyak A.V. Oscillometry: clinical significance and applications. *Pul'monologiya*. 2023; 33 (6): 798–808 (in Russian). DOI: 10.18093/0869-0189-2023-33-6-798-808

При ведении пациентов с болезнями органов дыхания (БОД) важную роль в клинической практике как для первичной оценки легочной вентиляции и легочного газообмена, так и при динамическом наблюдении за пациентами играет диагностика функции системы дыхания. Традиционно для выявления вентиляционных нарушений и механики дыхания используются спирометрия и бодиплетизмография. Эти методы отлично зарекомендовали себя в практическом здравоохранении, поскольку они хорошо стандартизированы и позволяют получать результаты, обладающие высокой повторяемостью и воспроизводимостью [1–3]. Для получения технически приемлемых результатов при проведении традиционных методов исследования необходимо тесное сотрудничество между медицинским персоналом и пациентом; существует также ряд ограничений, например, спирометрию не рекомендуется проводить в течение определенного времени после инфаркта миокарда, торакальных оперативных вмешательств, пневмоторакса [1, 2]. Однако в клинической практике встречаются ситуации, когда у таких пациентов или лиц, которые не могут выполнить максимальные дыхательные усилия, необходимо оценить механику дыхания. Осциллометрия (метод форсированных осцилляций) — это неинвазивный метод оценки механических свойств системы дыхания, основанный на анализе частотного поведения дыхательного аппарата человека в ответ на внешние колебания воздуха (осцилляции) при спокойном дыхании, т. е. такие маневры, как форсированный выдох или вдох, не требуются. Впервые этот метод был описан в 1956 г. [4]. Позднее предложена модификация осциллометрии — импульсная осциллометрия — метод, при котором используется импульсная форма подачи сигнала с помощью специального устройства — звукового генератора [5]. В Российской Федерации для оценки механики дыхания длительное время использовалась именно эта модификация осциллометрии. В настоящее время доступна методика форсированных осцилляций, медицинская техника для проведения которой представлена разными производителями. Осцилляции могут накладываться как на спонтанное спокойное дыхание, так и при респираторной поддержке, поэтому могут широко использоваться в ряде клинических ситуаций, при которых проведение обычных клинических тестов невозможно (например, у маленьких детей или во время искусственной вентиляции легких). По данным осциллометрии может значительно улучшиться понимание патофизиологических нарушений при БОД. По данным опубликованной в 2020 г. работы, посвященной техническим стандартам проведения осциллометрии, рассмотрены физиологические основы осциллометрических измерений и предложены стандарты проведения измерений, контроля над качеством

и интерпретации результатов [6]. В Российской Федерации в настоящее время таковые не представлены.

Целью данной работы явился анализ данных научной литературы и собственных результатов и оценка значимости и областей применения осциллометрии в клинической практике.

Физиологические аспекты измерения и основные параметры

С помощью осциллометрии возможно измерить общее сопротивление дыхательной системы (дыхательный импеданс (Z)), которое необходимо преодолеть, чтобы подать поток осцилляций в легкие. Дыхательный импеданс представляет собой сумму следующих показателей:

- сопротивление дыхательных путей (ДП) и тканей потоку (резистивное сопротивление (R));
- сопротивление, обусловленное эластичностью легких и грудной клетки в ответ на изменения объема;
- инерционное сопротивление дыхательной системы.

Таким образом, Z отражает совокупность сил, связанных с трением сопротивлением, эластичностью и инерционностью органов дыхания, которые необходимо преодолеть, чтобы обеспечить поток воздуха в легкие и из легких (вентиляцию легких). При помощи показателя Z описываются механические свойства не только ДП и легких, но и грудной клетки, т. е. всей дыхательной системы. Чаще всего регистрируется среднее значение Z за весь дыхательный цикл (как на вдохе, так и на выдохе) при частоте 5 Гц. В клинической практике при интерпретации результатов, как правило, само значение Z не используется, внимание акцентируется на его компонентах — резистивном сопротивлении (R) и сумме эластического и инерционного сопротивления (реактивный компонент дыхательного импеданса (X)).

Резистивный компонент сопротивления дыхательной системы (R) — это сопротивление сил трения (фрикционное сопротивление), возникающее как при движении газа по ДП, так и в легких и грудной клетке при их растяжении и деформации. При частоте обычного спокойного дыхания (приблизительно 0,2 Гц) и ниже R в большей степени обусловлен сопротивлением легочной ткани. По мере увеличения частоты вклад сопротивления тканей грудной клетки и легочной ткани снижается, и при частотах, значительно превышающих обычную частоту дыхания (≥ 5 Гц), R отражает изменения сопротивления ДП. Поэтому при сужении просвета ДП, например, вследствие бронхоспазма, воспаления ДП с отеком слизистой и гиперсекрецией слизи, R при частоте > 5 Гц увеличивается.

Частотная зависимость R — параметр, который в клинической практике обычно определяется как разница между R при частоте 5 (R_5) и 20 (R_{20}) Гц и обозначается как R_{5-20} . Также можно использовать относительную частотную зависимость R ($D(R_{5-20})$), которая рассчитывается следующим образом:

$$D(R_{5-20}) = (R_5 - R_{20}) / R_5 \times 100 \%$$

У детей частотная зависимость R имеется в норме, эта разница снижается по мере роста ребенка и его ДП. У здоровых взрослых людей R практически не зависит от частоты в диапазоне частот 5–40 Гц, т. е. значимой разницы величины R в этом диапазоне частот нет. Однако при многих БОД возникает значительное увеличение R при низких частотах по сравнению с R при более высоких частотах осцилляций — возникает патологическая частотная зависимость R . В качестве пороговых используются разные значения — от 0,03 [7–9] до 0,07 [10] кПа / л / с; 0,075 [11] и 0,085 [12] кПа / л / с. Патологическое увеличение R_{5-20} является диагностическим критерием дисфункции периферических (мелких) ДП (МДП). R_5 отражает сопротивление внегрудных, центральных ДП и МДП, а R_{20} — сопротивление внегрудных и центральных внутригрудных ДП 1-й генерации. У здоровых людей сопротивление МДП невелико, поэтому частотной зависимости сопротивления не существует и R_{5-20} не превышает пороговых значений. На практике возникновение частотной зависимости R может быть также следствием потери части осцилляторного потока за счет эффекта шунтирования, т. е. перехода колебаний на щеки, податливые структуры глотки и гортани (верхний шунт). Эффект верхнего шунта слабо выражен при осцилляциях низкой частоты и существенно возрастает при высокочастотных колебаниях, что может проявляться «ложным» повышением частотной зависимости R [13]. Чтобы убрать влияние верхнего шунта на результат, рекомендуется при проведении исследования прижимать ладони к щекам и хорошо фиксировать губами загубник.

Реактивный компонент дыхательного импеданса (реактанс (X)) включает в себя эластическое сопротивление дыхательной системы (E), которое зависит от эластических свойств грудной клетки, легких и их воздухонаполненности, и инерционное сопротивление дыхательной системы (I), которое определяется инерционностью смещающихся при дыхании тканей и воздуха и зависит от ускорения. При проведении осциллометрии показатель E всегда отрицателен, а I — всегда положителен. С увеличением частоты осцилляций E и I меняются разнонаправлено: показатель E уменьшается, а I — возрастает. При определенной частоте, называемой резонансной (f_{res}), эти разнонаправленные силы становятся равными по величине, а их сумма равна нулю.

При частотах меньше величины f_{res} в реактивном компоненте преобладает эластичность легочной ткани и грудной клетки, а при частотах больше f_{res} — инерционность дыхательной системы, связанная с перемещением воздуха в центральных ДП. Показатель X очень

зависит от величины объема легких. При БОД показатель X снижается и становится более отрицательным, что указывает на утрату эластичности дыхательной системы. При этом в отличие от растяжимости легких, показатель X снижается и при фиброзе легких, и при эмфиземе. Величина X при частоте 5 Гц (X_5), как и R_{5-20} , часто используется в качестве маркера дисфункции МДП [7, 9]. Некоторыми исследователями используется не среднее значение X_5 за 1 дыхательный цикл, а оценивается отдельно на вдохе и выдохе. Разница между этими значениями (DX_5) используется для выявления экспираторного ограничения воздушного потока [14, 15].

Резонансная частота (f_{res}) — это частота, при которой разнонаправленные показатели E и I становятся равными по величине, в результате $X = 0$. У здорового взрослого человека f_{res} составляет 7–12 Гц [16], что значительно превышает обычную частоту дыхания. При БОД показатель f_{res} обычно увеличен.

Площадь реактанса (A_X) — площадь над кривой реактивного компонента в частотном диапазоне от самой низкой частоты измерения (обычно 5 Гц) до значения f_{res} , которая иногда называется «треугольником Гольдмана» (*Goldman Triangle*) по имени предложившего этот параметр исследователя [17]. При БОД показатель A_X увеличивается. По мнению экспертов Европейского респираторного общества, в клинической практике показатель A_X является более чувствительным маркером изменения эластичности дыхательной системы по сравнению с величиной X на одной частоте [18].

Применение в клинической практике

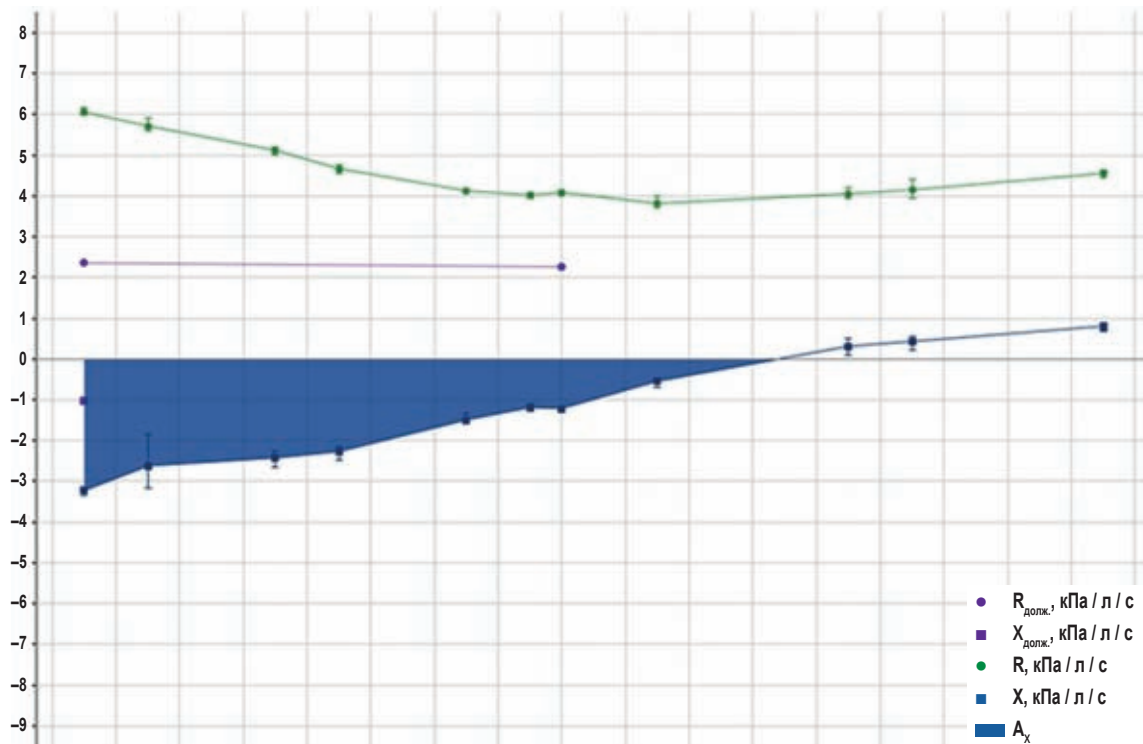
Заключение о важности применения осциллометрии в клинической практике сделано на основании собственного опыта и данных научной литературы. При использовании этого метода существенно расширяется понимание о патофизиологических нарушениях и клинических проявлениях многих БОД.

Бронхиальная астма

Основным диагностическим инструментом для оценки функции легких у пациентов с бронхиальной астмой (БА) является спирометрия, однако этот базовый в клинической практике метод при оценке МДП не является информативным. Существовавшее ранее представление о том, что скорость в начале форсированного выдоха определяется проходимостью проксимальных отделов ДП, а в конце форсированного выдоха — проходимостью дистальных бронхов, не получило достоверного подтверждения [19]. БА представляет собой сложный клинический синдром с гетерогенной группой фенотипов и эндотипов, при которых демонстрируются различные реакции на терапию. В настоящее время наблюдается тенденция к персонализации лечения БА в соответствии с фенотипом пациента [20, 21]. При фенотипе БА МДП наблюдается непрерывное неконтролируемое воспаление в дистальных ДП, которое не поддается регулярной терапии [22]. МДП

лишены хряща, а при БА они являются местом обширных процессов воспаления и ремоделирования, приводящих к обструкции ДП, поэтому более подвержены бронхоспазму [23]. Дисфункция МДП ассоциирована с бронхоконстрикцией и слабым контролем над БА [24]. МДП создают неоднородность вентиляции при БА, что свидетельствует о повышении периферического сопротивления воздушному потоку даже у пациентов с нормальным объемом форсированного выдоха за 1-ю секунду (ОФВ₁) [25]. Вентиляционная неоднородность, утолщение бронхиальной стенки вследствие воспаления приводят к повышению дыхательного импеданса (Z) и патологическому измене-

нию его компонентов — повышению резистанса (R), его частотной зависимости (R_{5-20}), площади реактанса (A_x) и резонансной частоты (f_{res}), снижению реактанса (X) [26, 27]. Отмечена значимость изучения частотной зависимости осцилляторных параметров при оценке состояния пациентов с обструктивными заболеваниями. S.Kjellberg *et al.* показано, что частотная зависимость резистанса (R) является полезным маркером неоднородности вентиляции и предиктором обострения при БА [28]. По данным P.A. Williamson, значительное увеличение частотной зависимости резистанса наблюдалось при тяжелой БА, выявлена корреляция между R_{5-20} и средней объемной скоростью потока форси-



	Измерение	Должное значение	% допж.		Z	CoV	SD
R_5 , кПа / л / с	6,5	2,36	256	13,16		0,014	0,083
R_{20} , кПа / л / с	4,08	2,27	180	6,83		—	—
R_{5-20} , кПа / л / с	1,97	—	—	—	—	—	—
X (5), кПа / л / с	-3,23	-1,02	318	-30,41		—	—
f_{res} , Гц	26,86	11,31	237	62,26		—	—
A_x , кПа / л	35,86	2,17	1 652	46,36		—	—
R (f_{res}), кПа / л / с	3,96	—	—	—	—	—	—
Z (5), кПа / л / с	6,86	—	—	—	—	—	—

Рисунок. Пример генерализованной обструкции у пациента с бронхиальной астмой (прибор Cosmed). Наблюдаются значительное повышение резистанса на частоте 5 Гц (256 %_{допж.}), умеренное повышение резистанса на частоте 20 Гц (180 %_{допж.}), резкое повышение частотной зависимости (1,97, что существенно выше верхней границы нормы), повышение резонансной частоты f_{res} (237 %_{допж.}) и площади реактанса A_x (1 652 %_{допж.})

Примечание: Z — дыхательный импеданс; CoV — ковариация; SD — стандартное отклонение.

Figure. Example of generalized obstruction in a patient with asthma (Cosmed device). There is a significant increase in resistance at a frequency of 5 Hz (256%_{pred.}), a moderate increase in resistance at a frequency of 20 Hz (180%_{pred.}), a significant increase in the frequency dependence (1.97, which is significantly higher than the reference upper limit), increase in resonant frequency f_{res} (237%_{pred.}) and reactance area A_x (1 652%_{pred.})

Note: Z — respiratory impedance; CoV — covariance; SD — standard deviation.

рованного выдоха между 25 и 75 % форсированной жизненной емкости легких (СОС_{25-75}) [29].

При легкой степени БА тяжесть обструкции по данным осциллометрии может быть более выражена, чем при спирометрии, а наиболее информативными являются такие показатели, как частотная зависимость резистанса (R_{5-20}) и площадь реактанса (A_x) [30].

По результатам многочисленных исследований у пациентов с БА подтверждена сильная и умеренная взаимосвязь осцилляторных параметров с показателями не только спирометрии, но и бодиплетизмографии [26, 27, 30]. Наиболее востребован метод осциллометрии в педиатрической практике. С помощью осциллометрии выявляются нарушения функции легких у маленьких детей с БА [31]. *E. Oostveen et al.* показано, что по данным осциллометрии у детей с персистирующими хрипами исходная функция легких была хуже по сравнению с таковой у детей с транзиторными хрипами [32]. У детей с рецидивирующими хрипами и / или БА в анамнезе, как правило, по данным осциллометрии выявляются вентиляционные нарушения даже при бессимптомном течении [33].

Параметры осцилляторной механики могут использоваться для контроля над лечением БА [34]. Пример генерализованной обструкции у пациента с БА представлен на рисунке.

Таким образом, осциллометрию можно считать дополнительным, а иногда и альтернативным методом спирометрии, поскольку при использовании этого метода возможно получить больше данных о поражении МДП у пациентов с БА.

Бронходилатационный тест

Для оценки бронходилатационного ответа европейские эксперты (2020) предложили ориентироваться на динамику следующих параметров осциллометрии: R_5 , X_5 и A_x , а в качестве пороговых значений, указывающих на положительный бронходилатационный ответ как у взрослых, так и у детей рекомендовали использовать снижение R_5 на 40 %, а A_x — на 80 % и увеличение X_5 на 50 % относительно исходного уровня [6].

В рекомендациях (2022) [18] в соответствии с изменением взглядов экспертов рабочей группы, которые разрабатывали технические стандарты проведения осциллометрии, предлагается изменить величину пороговых значений у взрослых: снижение R_5 — на 32 %, увеличение X_5 — на 44 %; у детей в качестве пороговых значений остаются те же подходы: снижение R_5 — на 40 %, увеличение X_5 — на 50 % [35].

При использовании оборудования разных производителей результаты бронходилатационного ответа при осциллометрии аналогичны. Кроме того, показано, что бронходилатационный ответ, который оценивался с помощью осциллометрии, позволяет лучше дифференцировать здоровых детей и детей с БА по сравнению с результатом, получаемым на основании оценки ОФВ₁ [32, 33]. Установлено также, что у взрослых с помощью осциллометрии положительный бронходилатационный ответ наблюдается чаще,

чем при спирометрии, при этом подчеркивается, что бронходилатационный ответ, оцененный с помощью форсированной осциллометрии, помогает выявить плохой контроль над БА [36, 37]. Параметры реактивного компонента дыхательного импеданса были более чувствительными при выявлении плохого контроля над БА, чем спирометрия [36]. *C.R. Kuo et al.* продемонстрировано, что осциллометрия обладает более высокой чувствительностью по сравнению со спирометрией при выявлении бронходилатационного ответа при плохо контролируемой БА, особенно у пациентов с сохраненным ОФВ₁ [37]. Таким образом, подчеркивается необходимость использования осциллометрии в качестве дополнения к спирометрии при БА.

Бронхопровокационный тест

Осциллометрия также может быть использована в качестве альтернативы спирометрии для проведения бронхопровокационного теста у взрослых и детей. В настоящее время результаты исследований сильно различаются — от 20 до 50 % увеличения R_5 и снижения на 20–80 % — X_5 .

Основным преимуществом осциллометрии для тестирования на наличие БА является повышенная чувствительность при выявлении бронхоконстрикции, при этом отмечается сокращение времени проведения теста и снижение кумулятивной дозы препарата. Однако у детей может быть недооценена реакция, возникающая из-за потери колебательного потока в верхних и крупных ДП, известная как шунт верхних ДП [18].

Хроническая обструктивная болезнь легких

При изучении параметров осциллометрии у больных хронической обструктивной болезнью легких (ХОБЛ) различной степени тяжести показано, что с увеличением тяжести обструкции повышается резистанс и снижается реактанс, причем при более низкой степени обструкции больше информации дают параметры резистанса, в то время как при тяжелой обструкции данные реактанса становятся более чувствительными [38]. По результатам многочисленных исследований продемонстрирована значительная корреляция между параметрами осциллометрии и спирометрии у пациентов с ХОБЛ. *X. Wei et al.* выявлена достоверная взаимосвязь показателей осциллометрии с данными не только спирометрии и бодиплетизмографии, но и диффузионной способности легких [39]. У пациентов с ХОБЛ наиболее тесные взаимосвязи с традиционными легочными тестами отмечены у параметров реактанса — X_5 , f_{res} и A_x . Эти параметры точнее, чем параметры резистанса, отражали нарушения проходимости ДП, дисфункцию МДП, «воздушные ловушки». Из показателей резистанса лучшую взаимосвязь показала абсолютная и относительная частотная зависимость (R_{5-20} , (R_{5-20}) / R_5). Выявлен рост соотношения (R_{5-20}) / R_5 относительно повышения степени тяжести ХОБЛ, что отражает увеличение доли периферических ДП в общем дыхательном сопротивлении. Показаны возможности осциллометрии как альтернативного метода

оценки легочной функции у пациентов с тяжелыми функциональными нарушениями при ХОБЛ (ОФВ₁ < 50 %_{долж.}), нуждающихся в терапии ингаляционными глюкокортикостероидами.

При сравнении спирометрии с осциллометрией *H. Mousa et al.* сделан вывод о том, что осциллометрия более чувствительна при выявлении легкой обструкции ДП и менее чувствительна при более выраженной дисфункции ДП, чем спирометрия [40].

Измерения, выполненные с помощью осциллометрии, достоверно коррелируют со степенью изменений в МДП, измеренных с помощью эндобронхиальной оптической когерентной томографии. При помощи показателей резонансной частоты (f_{res} и R_{5-20}) выявляются нарушения, особенно на ранних стадиях заболевания, но при этом более информативные, чем ОФВ₁. Степень тяжести заболевания отражалась в ухудшении результатов осциллометрии [41].

Повышенная вентиляционная неоднородность МДП у больных ХОБЛ тесно связана с повышением частотной зависимости резистанса и изменением реактанса дыхательной системы [42].

Муковисцидоз

У детей с муковисцидозом (МВ) показатели осциллометрии, как правило, находятся в нормальном диапазоне [43–45], однако в работе *О. Ф. Лукиной* продемонстрировано статистическое различие между показателями осциллометрии у здоровых детей и детей с МВ среднетяжелого течения [46]. Показано также, что по мере прогрессирования заболевания с возрастом показатели функции дыхания снижаются. По данным немногочисленных работ по оценке применения осциллометрии у взрослых больных МВ продемонстрировано снижение как резистивного компонента дыхательного импеданса с частотной зависимостью R , так и реактивного, что приводило к увеличению показателей f_{res} и A_x [47, 48]. Показатели осциллометрии коррелируют не только с данными спирометрии и бодиплетизмографии [47, 48], но и со степенью одышки [47].

Таким образом, основным преимуществом применения осциллометрии является возможность адекватной оценки механики дыхания и степени бронхиальной обструкции у больных МВ, которые не могут качественно выполнить спирометрию, бодиплетизмографию (маленькие дети, тяжелобольные) или у которых есть относительные противопоказания к проведению дыхательных маневров с максимальным усилием (например, пневмоторакс).

Туберкулез

У больных туберкулезом легких метод форсированных осцилляций используется для диагностики и контроля над лечением. При сопоставлении результатов осциллометрии до и после лечения туберкулеза легких *Е. М. Жуковой* установлено, что динамика резистанса после лечения отмечалась у 62 % больных — значительно чаще, чем динамика спирометрических по-

казателей: «спокойная» спирография — 35 %, кривая поток—объем — 38 % [49].

У пациентов с туберкулезом легких параметры осциллометрии статистически значимо коррелируют с показателями спирометрии, бодиплетизмографии и диффузионной способности легких. Общее дыхательное сопротивление, его резистивный компонент и параметры, отражающие эластическую часть реактивного компонента, повышаются при увеличении объема специфического поражения легочной ткани [50]. У пациентов с объемом деструкции легочной ткани > 5 000 мм³ частота выявления генерализованной обструкции увеличивается в 3,5 раза, периферической — в 1,6 раза. Наибольшая чувствительность, прогностическая точность положительного и отрицательного результатов у больных туберкулезом легких выявлена при выраженных обструктивных нарушениях (ОФВ₁ < 70 %_{долж.}). Осциллометрия является высокоинформативным методом функциональной диагностики, по результатам которого у больных туберкулезом легких в спокойном дыхательном режиме определяются наличие и степень обструкции, уровень поражения бронхиального дерева, что важно при необходимости обследования функции дыхания у ослабленных больных и пациентов с признаками кровохарканья.

Рестриктивные нарушения

В работах, посвященных изучению осцилляторной механики при рестриктивном варианте вентиляционных нарушений, отмечены некоторые различия, связанные с нозологией заболеваний, вызывающих рестрикцию, и способами ее выявления (комплекс функциональных тестов, включающий бодиплетизмографию, или только спирометрия).

По данным большинства исследований отмечено, что у больных с рестриктивным типом вентиляционных нарушений в большей степени изменяется реактивный компонент общего дыхательного сопротивления: снижается показатель X , резонансная частота f_{res} сдвигается в область высоких частот [51–54]. Показана положительная корреляционная связь показателя f_{res} со шкалой фиброза по данным компьютерной томографии у больных интерстициальными легочными заболеваниями [54]. Однако увеличение резонансной частоты f_{res} не является специфичным для рестриктивного типа нарушений, аналогичные изменения регистрируются также у больных с обструкцией ДП. Вероятно, при обструктивной патологии дополнительной причиной сдвига показателя f_{res} является снижение инерционного сопротивления в связи с уменьшением объема воздуха, перемещаемого по суженным воздухоносным путям, а у больных с интерстициальными заболеваниями легких аналогичный сдвиг обусловлен нарастанием эластического сопротивления легочной ткани. Это подтверждается выявленной при корреляционном анализе сильной положительной зависимостью резонансной частоты от индекса ретракции и ее значительной отрицательной зависимостью от растяжимости легочной ткани [51].

По мере прогрессирования рестриктивных нарушений общее дыхательное сопротивление Z увеличивается преимущественно за счет реактивного компонента X . Резистивный компонент на частоте 5 и 20 Гц остается в пределах нормы [51, 52]. По данным исследования Л.Д.Кирюхиной и соавт. проанализированы результаты осциллометрии у пациентов с идиопатическими интерстициальными пневмониями, большую часть которых составили лица с идиопатическим легочным фиброзом [51]. В этой группе пациентов значимой частотной зависимости резистанса не выявлено, однако следует отметить, что при выраженном снижении общей емкости легких $< 65\%$ долж. регистрировалось незначительное увеличение резистанса со статистически значимым умеренным нарастанием его частотной зависимости. Эти изменения, по всей вероятности, были обусловлены ухудшением проходимости дистальных ДП в связи с грубым нарушением архитектоники легочной ткани и облитерацией бронхоиол, возникшей на фоне формирования «сотового легкого». По данным исследования О.И.Савушкиной и соавт., в которое были включены пациенты с рестриктивным вариантом вентиляционных нарушений с более разнообразной бронхолегочной патологией, резистанс на частоте 5 и 20 Гц также не превышал границ нормальных значений, относительная частотная зависимость резистанса находилась в пределах нормальных значений, однако абсолютная частотная зависимость R_{5-20} превышала верхнюю границу нормы [52]. Сделан вывод о том, что осциллометрия является малочувствительным методом для выявления вентиляционных нарушений рестриктивного типа при небольшом (до 70% долж.) снижении общей емкости легких, т. к. в этом случае основные параметры резистанса и реактанса остаются в пределах нормальных значений.

При анализе параметров осциллометрии у пациентов с интерстициальными заболеваниями легких и рестриктивным паттерном вентиляции А. Sugiyama et al. показано, что отличительной чертой явилось различие реактанса на частоте 5 Гц в разных фазах дыхательного цикла (величина X_5 на вдохе была достоверно ниже, чем на выдохе) [55].

Таким образом, заподозрить рестриктивный характер вентиляционных нарушений можно при снижении реактивного сопротивления (X), повышении резонансной частоты (f_{res}), в то время как резистивный компонент общего дыхательного сопротивления и его частотная зависимость остаются в норме.

Заключение

Таким образом, осциллометрия считается дополнительным, а иногда и альтернативным спирометрии методом, поскольку используется при спокойном дыхании. Метод особенно удобен при функциональном обследовании системы дыхания у пациентов, которые не в состоянии выполнить требования, предъявляемые при выполнении обследования методами спирометрии или бодиплетизмографии, при которых требуются усилия и координация, в частности, маленьких

детей или лиц с физическими или когнитивными ограничениями. Осциллометрия является эффективным инструментом для диагностики обструктивного варианта вентиляционных нарушений, особенно при обструкции МДП, который следует использовать в качестве дополнительного теста к спирометрии для уточнения фенотипов заболеваний с поражением МДП, учитывая важность стратегии, основой которой являются многомерный контроль и персонализированное ведение пациентов с БОД.

Список сокращений

БА – бронхиальная астма
 БОД – болезни органов дыхания
 ДП – дыхательные пути
 МВ – муковисцидоз
 МДП – мелкие дыхательные пути
 ОФВ₁ – объем форсированного выдоха за 1-ю секунду
 СОС₂₅₋₇₅ – средняя объемная скорость при выдохе от 25 до 75 % форсированной жизненной емкости легких
 ХОБЛ – хроническая обструктивная болезнь легких
 A_x – площадь над кривой реактивного компонента в частотном диапазоне от самой низкой частоты измерения (обычно 5 Гц) до значения f_{res} (площадь реактанса)
 CoV – ковариация
 D – относительная частотная зависимость R (R_{5-20})
 E – эластическое сопротивление дыхательной системы
 f_{res} – резонансная частота
 I – инерционное сопротивление дыхательной системы
 SD (*standard deviation*) – стандартное отклонение
 R_{5-20} – частотная зависимость (разница между R при частоте 5 (R_5) и 20 (R_{20}) Гц)
 R_5 – резистивное сопротивление дыхательной системы при частоте 5 Гц
 R_{20} – резистивное сопротивление дыхательной системы при частоте 20 Гц
 R – резистивное сопротивление (резистанс)
 X_5 – реактивный компонент дыхательного импеданса при частоте 5 Гц
 X – реактивный компонент дыхательного импеданса (реактанс)
 Z – общее сопротивление дыхательной системы

Литература

1. Каменева М.Ю., Черняк А.В., Айсанов З.Р. и др. Спирометрия: методическое руководство по проведению исследования и интерпретации результатов. Межрегиональная общественная организация «Российское респираторное общество» Общероссийская общественная организация «Российская ассоциация специалистов функциональной диагностики» Общероссийская общественная организация «Российское научно-медицинское общество терапевтов». Пульмонология. 2023; 33 (3): 307–340. DOI: 10.18093/08690189-2023-33-3-307-340.
2. 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.

3. Bhakta N.R., McGowan A., Ramsey K.A. et al. European Respiratory Society/American Thoracic Society technical statement: standardisation of the measurement of lung volumes, 2023 update. *Eur. Respir. J.* 2023; 62 (4): 2201519. DOI: 10.1183/13993003.01519-2022.
4. Dubois A.B., Brody A.W., Lewis D.H., Burgess B.F. Jr. Oscillation mechanics of lungs and chest in man. *J. Appl. Physiol.* 1956; 8 (6): 587–594. DOI: 10.1152/jappl.1956.8.6.587.
5. Muller E., Vogel J. [Measurement and model-interpretation of new parameters of lung mechanics (author's transl)]. *Z. Erkr. Atmungsorgane.* 1981; 157 (3): 340–344 (in German).
6. 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.
7. Williamson P.A., Clearie K., Menzies D. et al. Assessment of small-airways disease using alveolar nitric oxide and impulse oscillometry in asthma and COPD. *Lung.* 2011; 189 (2): 121–129. DOI: 10.1007/s00408-010-9275-y.
8. Anderson W.J., Zajda E., Lipworth B.J. Are we overlooking persistent small airways dysfunction in community-managed asthma? *Ann. Allergy Asthma Immunol.* 2012; 109 (3): 185–189.e2. DOI: 10.1016/j.anai.2012.06.022.
9. Postma D.S., Brightling C., Baldi S. et al. Exploring the relevance and extent of small airways dysfunction in asthma (ATLANTIS): baseline data from a prospective cohort study. *Lancet Respir. Med.* 2019; 7 (5): 402–416. DOI: 10.1016/S2213-2600(19)30049-9.
10. Oppenheimer B.W., Goldring R.M., Herberg M.E. et al. Distal airway function in symptomatic subjects with normal spirometry following World Trade Center dust exposure. *Chest.* 2007; 132 (4): 1275–1282. DOI: 10.1378/chest.07-0913.
11. Berger K.I., Turetz M., Liu M. et al. Oscillometry complements spirometry in evaluation of subjects following toxic inhalation. *ERJ Open Res.* 2015; 1 (2): 00043-2015. DOI: 10.1183/23120541.00043-2015.
12. Кирухина Л.Д., Лаврушин А.А., Аганезова Е.С. Критерии отклонения от нормы некоторых параметров импульсной осциллометрии. *Пульмонология.* 2004; (5): 41–44. Доступно на: <https://journal.pulmonology.ru/pulm/article/view/2468/1916>
13. 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.
14. Dellacà R.L., Santus P., Aliverti A. et al. Detection of expiratory flow limitation in COPD using the forced oscillation technique. *Eur. Respir. J.* 2004; 23 (2): 232–240. DOI: 10.1183/09031936.04.00046804.
15. Aarli B.B., Calverley P.M., Jensen R.L. et al. Variability of within-breath reactance in COPD patients and its association with dyspnea. *Eur. Respir. J.* 2015; 45 (3): 625–634. DOI: 10.1183/09031936.00051214.
16. Wouters E.F., Polko A.H., Schouten H.J., Visser B.F. Contribution of impedance measurement of the respiratory system to bronchial challenge tests. *J. Asthma.* 1988; 25 (5): 259–267. DOI: 10.3109/02770908809073211.
17. Meraz E.G., Nazeran H., Ramos C.D. et al. Analysis of impulse oscillometric measures of lung function and respiratory system model parameters in small airway-impaired and healthy children over a 2-year period. *Biomed. Eng. Online.* 2011; 10: 21. DOI: 10.1186/1475-925X-10-21.
18. Kaminsky D.A., Simpson S.J., Berger K.I. et al. Clinical significance and applications of oscillometry. *Eur. Respir. Rev.* 2022; 31 (163): 210208. DOI: 10.1183/16000617.0208-2021.
19. Стручков П.В., Лукина О.Ф., Дроздов Д.В. Спирометрия. В кн.: Берестень Н.Ф., Сандриков В.А., Федоров С.И., ред. Функциональная диагностика. Национальное руководство. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2019: 574–596.
20. Wenzel S.E. Complex phenotypes in asthma: current definitions. *Pulm. Pharmacol. Ther.* 2013; 26 (6): 710–715. DOI: 10.1016/j.pupt.2013.07.003.
21. Wadsworth S.J., Sandford A.J. Personalised medicine and asthma diagnostics/management. *Curr. Allergy Asthma Rep.* 2013; 13 (1): 118–129. DOI: 10.1007/s11882-012-0325-9.
22. Usmani O.S. Treating the small airways. *Respiration.* 2012; 84 (6): 441–453. DOI: 10.1159/000343629.
23. Alfieri V., Aiello M., Pisi R. et al. Small airway dysfunction is associated to excessive bronchoconstriction in asthmatic patients. *Respir. Res.* 2014; 15 (1): 86. DOI: 10.1186/s12931-014-0086-1.
24. Downie S.R., Salome C.M., Verbanck S. et al. Ventilation heterogeneity is a major determinant of airway hyperresponsiveness in asthma, independent of airway inflammation. *Thorax.* 2007; 62 (8): 684–689. DOI: 10.1136/thx.2006.069682.
25. Sorkness R.L., Bleecker E.R., Busse W.W. et al. Lung function in adults with stable but severe asthma: air trapping and incomplete reversal of obstruction with bronchodilation. *J. Appl. Physiol.* (1985). 2008; 104 (2): 394–403. DOI: 10.1152/japplphysiol.00329.2007.
26. 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.
27. Савушкина О.И., Черняк А.В., Крюков Е.В. и др. Импульсная осциллометрия в диагностике обструкции дыхательных путей среднетяжелой степени выраженности. *Клиническая практика.* 2018; 9 (4): 33–39. DOI: 10.17816/clinpract9433-39.
28. Kjellberg S., Houtz B.K., Zetterström O. et al. Clinical characteristics of adult asthma associated with small airway dysfunction. *Respir. Med.* 2016; 117: 92–102. DOI: 10.1016/j.rmed.2016.05.028.
29. Williamson P.A., Clearie K., Menzies D. et al. Assessment of small-airways disease using alveolar nitric oxide and impulse oscillometry in asthma and COPD. *Lung.* 2011; 189 (2): 121–129. DOI: 10.1007/s00408-010-9275-y.
30. 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.
31. Klug B., Bisgaard H. Lung function and short-term outcome in young asthmatic children. *Eur. Respir. J.* 1999; 14 (5): 1185–1189. DOI: 10.1183/09031936.99.14511859.
32. Oostveen E., Dom S., Desager K. et al. Lung function and bronchodilator response in 4-year-old children with different wheezing phenotypes. *Eur. Respir. J.* 2010; 35 (4): 865–872. DOI: 10.1183/09031936.00023409.
33. Song T.W., Kim K.W., Kim E.S. et al. Utility of impulse oscillometry in young children with asthma. *Pediatr. Allergy Immunol.* 2008; 19 (8): 763–768. DOI: 10.1111/j.1399-3038.2008.00734.x.
34. Akamatsu T., Shirai T., Shimoda Y. et al. Forced oscillation technique as a predictor of FEV1 improvement in asthma. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2017; 236: 78–83. DOI: 10.1016/j.resp.2016.11.013.
35. Thamrin C., Dellacà R.L., Hall G.L. et al. Technical standards for respiratory oscillometry: test loads for calibration and verification. *Eur. Respir. J.* 2020; 56 (4): 2003369. DOI: 10.1183/13993003.03369-2020.
36. Cotte A.M., Secombe L.M., Thamrin C. et al. Bronchodilator response assessed by the forced oscillation technique identifies poor asthma control with greater sensitivity than spirometry. *Chest.* 2020; 157 (6): 1435–1441. DOI: 10.1016/j.chest.2019.12.035.
37. Kuo C.R., Chan R., Lipworth B. Impulse oscillometry bronchodilator response and asthma control. *J. Allergy Clin. Immunol. Pract.* 2020; 8 (10): 3610–3612. DOI: 10.1016/j.jaip.2020.07.031.
38. Di Mango A.M., Lopes A.J., Jansen J.M., Melo P.L. Changes in respiratory mechanics with increasing degrees of airway obstruction in COPD: Detection by forced oscillation technique. *Respir. Med.* 2006; 100 (3): 399–410. DOI: 10.1016/j.rmed.2005.07.005.
39. Wei X., Shi Zh., 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.
40. Mousa H., Kamal E. Impulse oscillation system versus spirometry in assessment of obstructive airway diseases. *Egypt. J. Chest Dis. Tuberc.* 2018; 67 (2): 106. DOI: 10.4103/ejcdt.ejcdt_3_18.
41. Su Z.Q., Guan W.J., Li S.Y. et al. Significances of spirometry and impulse oscillometry for detecting small airway disorders assessed with endobronchial optical coherence tomography in COPD. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2018; 13: 3031–3044. DOI: 10.2147/COPD.S172639.
42. Jarenbäck L., Eriksson G., Peterson S. et al. Bronchodilator response of advanced lung function parameters depending on COPD severity. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2016; 11: 2939–2950. DOI: 10.2147/COPD.S111573.
43. Kerby G.S., Rosenfeld M., Ren C.L. et al. Lung function distinguishes preschool children with CF from healthy controls in a multi-center

- setting. *Pediatr. Pulmonol.* 2012; 47 (6): 597–605. DOI: 10.1002/ppul.21589.
44. Ramsey K.A., Ranganathan S.C., Gangell C.L. et al. Impact of lung disease on respiratory impedance in young children with cystic fibrosis. *Eur. Respir. J.* 2015; 46 (6): 1672–1679. DOI: 10.1183/13993003.00156-2015.
 45. Nielsen K.G., Pressler T., Klug B. et al. Serial lung function and responsiveness in cystic fibrosis during early childhood. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2004; 169 (11): 1209–1216. DOI: 10.1164/rccm.200303-347OC.
 46. Лукина О.Ф. Особенности нарушения функции легких при муковисцидозе у детей. В кн.: Капранов Н.И., Каширская Н.Ю., ред. Муковисцидоз. М.: Медпрактика-М; 2014: 229–248.
 47. Черняк А.В., Амелина Е.Л. Применение импульсной осциллометрии у больных муковисцидозом. *Пульмонология.* 2005; (2): 84–88. DOI: 10.18093/0869-0189-2005-0-2-84-88.
 48. Lima A.N., Faria A.C., Lopes A.J. et al. Forced oscillations and respiratory system modeling in adults with cystic fibrosis. *Biomed. Eng. Online.* 2015; 14: 11. DOI: 10.1186/s12938-015-0007-7.
 49. Жукова Е.М., Краснов В.А., Вохминова Л.Г. Комплексное изучение состояния бронхиальной проходимости у больных активным туберкулезом легких до и по завершении стационарного лечения. *Туберкулез и болезни легких.* 2015; (8): 32–37. Доступно на: <https://www.tibl-journal.com/jour/article/view/783/784>
 50. Кирюхина Л.Д., Володич О.С., Денисова Н.В. и др. Импульсная осциллометрия в диагностике obstructивных 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.
 51. Кирюхина Л.Д., Каменева М.Ю., Новикова Л.Н. Возможности импульсной осциллометрии в диагностике рестриктивного варианта вентиляционных нарушений. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2017; (5): 136–141. DOI: 10.23670/IRJ.2017.59.032.
 52. 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.
 53. Semenova E., Kameneva M., Tishkov A. et al. Relationship between the impulse oscillometry parameters and the lung damage in idiopathic pulmonary fibrosis patients. *Eur. Respir. J.* 2013; 42 (Suppl. 57): 1284. Available at: https://erj.ersjournals.com/content/42/Suppl_57/P1284
 54. Fujii M., Shirai T., Mori K. et al. Inspiratory resonant frequency of forced oscillation technique as a predictor of the composite physiologic index in interstitial lung disease. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2015; 207: 22–27. DOI: 10.1016/j.resp.2014.12.009.
 55. Sugiyama A., Hattori N., Haruta Y. et al. Characteristics of inspiratory and expiratory reactance in interstitial lung disease. *Respir. Med.* 2013; 107 (6): 875–882. DOI: 10.1016/j.rmed.2013.03.005.
 56. Muller E., Vogel J. [Measurement and model-interpretation of new parameters of lung mechanics (author's transl)]. *Z. Erkr. Atmungsorgane.* 1981; 157 (3): 340–344 (in German).
 57. 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.
 58. Williamson P.A., Clearie K., Menzies D. et al. Assessment of small-airways disease using alveolar nitric oxide and impulse oscillometry in asthma and COPD. *Lung.* 2011; 189 (2): 121–129. DOI: 10.1007/s00408-010-9275-y.
 59. Anderson W.J., Zajda E., Lipworth B.J. Are we overlooking persistent small airways dysfunction in community-managed asthma? *Ann. Allergy Asthma Immunol.* 2012; 109 (3): 185–189.e2. DOI: 10.1016/j.anai.2012.06.022.
 60. Postma D.S., Brightling C., Baldi S. et al. Exploring the relevance and extent of small airways dysfunction in asthma (ATLANTIS): baseline data from a prospective cohort study. *Lancet Respir. Med.* 2019; 7 (5): 402–416. DOI: 10.1016/S2213-2600(19)30049-9.
 61. Oppenheimer B.W., Goldring R.M., Herberg M.E. et al. Distal airway function in symptomatic subjects with normal spirometry following World Trade Center dust exposure. *Chest.* 2007; 132 (4): 1275–1282. DOI: 10.1378/chest.07-0913.
 62. Berger K.I., Turetz M., Liu M. et al. Oscillometry complements spirometry in evaluation of subjects following toxic inhalation. *ERJ Open Res.* 2015; 1 (2): 00043-2015. DOI: 10.1183/23120541.00043-2015.
 63. Kiryukhina L.D., Lavrushin A.A., Aganezova E.S. [Assessment of impulse oscillometry parameters]. *Pul'monologiya.* 2004; (5): 41–44. Available at: <https://journal.pulmonology.ru/pulm/article/view/2468/1916> (in Russian).
 64. 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.
 65. Dellacà R.L., Santus P., Aliverti A. et al. Detection of expiratory flow limitation in COPD using the forced oscillation technique. *Eur. Respir. J.* 2004; 23 (2): 232–240. DOI: 10.1183/09031936.04.00046804.
 66. Aarli B.B., Calverley P.M., Jensen R.L. et al. Variability of within-breath reactance in COPD patients and its association with dyspnea. *Eur. Respir. J.* 2015; 45 (3): 625–634. DOI: 10.1183/09031936.00051214.
 67. Wouters E.F., Polko A.H., Schouten H.J., Visser B.F. Contribution of impedance measurement of the respiratory system to bronchial challenge tests. *J. Asthma.* 1988; 25 (5): 259–267. DOI: 10.3109/02770908809073211.
 68. Meraz E.G., Nazeran H., Ramos C.D. et al. Analysis of impulse oscillometric measures of lung function and respiratory system model parameters in small airway-impaired and healthy children over a 2-year period. *Biomed. Eng. Online.* 2011; 10: 21. DOI: 10.1186/1475-925X-10-21.
 69. Kaminsky D.A., Simpson S.J., Berger K.I. et al. Clinical significance and applications of oscillometry. *Eur. Respir. Rev.* 2022; 31 (163): 210208. DOI: 10.1183/16000617.0208-2021.
 70. Struchkov P.V., Lukina O.F., Drozdov D.V. [Spirometry]. In: Beresten' N.F., Sandrikov V.A., Fedorov S.I., eds. [Functional diagnostics. National guidance]. Moscow: GEOTAR-Media; 2019: 574–596 (in Russian).
 71. Wenzel S.E. Complex phenotypes in asthma: current definitions. *Pulm. Pharmacol. Ther.* 2013; 26 (6): 710–715. DOI: 10.1016/j.pupt.2013.07.003.
 72. Wadsworth S.J., Sandford A.J. Personalised medicine and asthma diagnostics/management. *Curr. Allergy Asthma Rep.* 2013; 13 (1): 118–129. DOI: 10.1007/s11882-012-0325-9.
 73. Usmani O.S. Treating the small airways. *Respiration.* 2012; 84 (6): 441–453. DOI: 10.1159/000343629.
 74. Alfieri V., Aiello M., Pisi R. et al. Small airway dysfunction is associated to excessive bronchoconstriction in asthmatic patients. *Respir. Res.* 2014; 15 (1): 86. DOI: 10.1186/s12931-014-0086-1.
 75. Downie S.R., Salome C.M., Verbanck S. et al. Ventilation heterogeneity is a major determinant of airway hyperresponsiveness in asthma, independent of airway inflammation. *Thorax.* 2007; 62 (8): 684–689. DOI: 10.1136/thx.2006.069682.
 76. Sorkness R.L., Bleecker E.R., Busse W.W. et al. Lung function in adults with stable but severe asthma: air trapping and incomplete

Поступила: 30.09.23
Принята к печати: 16.11.23

References

1. Kameneva M.Yu., Cherniak A.V., Aisanov Z.R. et al. [Spirometry: national guidelines for the testing and interpretation of results. Interregional Public Organization “Russian Respiratory Society” All-Russian Public Organization “Russian Association of Specialists in Functional Diagnostics” All-Russian Public Organization “Russian Scientific Medical Society of Therapists”]. *Pul'monologiya.* 2023; 33 (3): 307–340. DOI: 10.18093/08690189-2023-33-3-307-340 (in Russian).
2. 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.
3. Bhakta N.R., McGowan A., Ramsey K.A. et al. European Respiratory Society/American Thoracic Society technical statement: standardisation of the measurement of lung volumes, 2023 update. *Eur. Respir. J.* 2023; 62 (4): 2201519. DOI: 10.1183/13993003.01519-2022.
4. Dubois A.B., Brody A.W., Lewis D.H., Burgess B.F. Jr. Oscillation mechanics of lungs and chest in man. *J. Appl. Physiol.* 1956; 8 (6): 587–594. DOI: 10.1152/jappl.1956.8.6.587.

- reversal of obstruction with bronchodilation. *J. Appl. Physiol.* (1985). 2008; 104 (2): 394–403. DOI: 10.1152/japplphysiol.00329.2007.
26. 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).
 27. Savushkina O.I., Chernyak A.V., Kryukov E.V. et al. [Impulse oscillometry in the diagnosis of moderately severe airway obstruction]. *Klinicheskaya praktika*. 2018; 9 (4): 33–39. DOI: 10.17816/clinpract9433–39 (in Russian).
 28. Kjellberg S., Houlitz B.K., Zetterström O. et al. Clinical characteristics of adult asthma associated with small airway dysfunction. *Respir. Med.* 2016; 117: 92–102. DOI: 10.1016/j.rmed.2016.05.028.
 29. Williamson P.A., Clearie K., Menzies D. et al. Assessment of small-airways disease using alveolar nitric oxide and impulse oscillometry in asthma and COPD. *Lung*. 2011; 189 (2): 121–129. DOI: 10.1007/s00408-010-9275-y.
 30. Leont'eva 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]. *Arhiv vnutrenney meditsiny*. 2019; 9 (3): 213–221. DOI: 10.20514/2226-6704-2019-9-3-213-221 (in Russian).
 31. Klug B., Bisgaard H. Lung function and short-term outcome in young asthmatic children. *Eur. Respir. J.* 1999; 14 (5): 1185–1189. DOI: 10.1183/09031936.99.14511859.
 32. Oostveen E., Dom S., Desager K. et al. Lung function and bronchodilator response in 4-year-old children with different wheezing phenotypes. *Eur. Respir. J.* 2010; 35 (4): 865–872. DOI: 10.1183/09031936.2010.23409.
 33. Song T.W., Kim K.W., Kim E.S. et al. Utility of impulse oscillometry in young children with asthma. *Pediatr. Allergy Immunol.* 2008; 19 (8): 763–768. DOI: 10.1111/j.1399-3038.2008.00734.x.
 34. Akamatsu T., Shirai T., Shimoda Y. et al. Forced oscillation technique as a predictor of FEV1 improvement in asthma. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2017; 236: 78–83. DOI: 10.1016/j.resp.2016.11.013.
 35. Thamrin C., Dellacà R.L., Hall G.L. et al. Technical standards for respiratory oscillometry: test loads for calibration and verification. *Eur. Respir. J.* 2020; 56 (4): 2003369. DOI: 10.1183/13993003.2003369-2020.
 36. Cotte A.M., Seccombe L.M., Thamrin C. et al. Bronchodilator response assessed by the forced oscillation technique identifies poor asthma control with greater sensitivity than spirometry. *Chest*. 2020; 157 (6): 1435–1441. DOI: 10.1016/j.chest.2019.12.035.
 37. Kuo C.R., Chan R., Lipworth B. Impulse oscillometry bronchodilator response and asthma control. *J. Allergy Clin. Immunol. Pract.* 2020; 8 (10): 3610–3612. DOI: 10.1016/j.jaip.2020.07.031.
 38. Di Mango A.M., Lopes A.J., Jansen J.M., Melo P.L. Changes in respiratory mechanics with increasing degrees of airway obstruction in COPD: Detection by forced oscillation technique. *Respir. Med.* 2006; 100 (3): 399–410. DOI: 10.1016/j.rmed.2005.07.005.
 39. Wei X., Shi Zh., 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.
 40. Mousa H., Kamal E. Impulse oscillation system versus spirometry in assessment of obstructive airway diseases. *Egypt. J. Chest Dis. Tuberc.* 2018; 67 (2): 106. DOI: 10.4103/ejcdt.ejcdt_3_18.
 41. Su Z.Q., Guan W.J., Li S.Y. et al. Significances of spirometry and impulse oscillometry for detecting small airway disorders assessed with endobronchial optical coherence tomography in COPD. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2018; 13: 3031–3044. DOI: 10.2147/COPD.S172639.
 42. Jarenbäck L., Eriksson G., Peterson S. et al. Bronchodilator response of advanced lung function parameters depending on COPD severity. *Int. J. Chron. Obstruct. Pulmon. Dis.* 2016; 11: 2939–2950. DOI: 10.2147/COPD.S111573.
 43. Kerby G.S., Rosenfeld M., Ren C.L. et al. Lung function distinguishes preschool children with CF from healthy controls in a multi-center setting. *Pediatr. Pulmonol.* 2012; 47 (6): 597–605. DOI: 10.1002/ppul.21589.
 44. Ramsey K.A., Ranganathan S.C., Gangell C.L. et al. Impact of lung disease on respiratory impedance in young children with cystic fibrosis. *Eur. Respir. J.* 2015; 46 (6): 1672–1679. DOI: 10.1183/13993003.00156-2015.
 45. Nielsen K.G., Pressler T., Klug B. et al. Serial lung function and responsiveness in cystic fibrosis during early childhood. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2004; 169 (11): 1209–1216. DOI: 10.1164/rccm.200303-347OC.
 46. Lukina O.F. [Features of pulmonary dysfunction in cystic fibrosis in children]. In: Kapranov N.I., Kashirskaya N.Yu., eds. [Cystic fibrosis]. Moscow: Medpraktika-M; 2014: 229–248 (in Russian).
 47. Cherniak A.V., Amelina E.L. [Application of impulse oscillometry in cystic fibrosis patients]. *Pul'monologiya*. 2005; (2): 84–88. DOI: 10.18093/0869-0189-2005-0-2-84-88 (in Russian).
 48. Lima A.N., Faria A.C., Lopes A.J. et al. Forced oscillations and respiratory system modeling in adults with cystic fibrosis. *Biomed. Eng. Online*. 2015; 14: 11. DOI: 10.1186/s12938-015-0007-7.
 49. Zhukova E.M., Krasnov V.A., Vokhminova L.G. [Integrated assessment of bronchial patency in active pulmonary tuberculosis treatment before and after the in-patient treatment]. *Tuberkulez i bolezni legkikh*. 2015; (8): 32–37. Available at: <https://www.tibl-journal.com/jour/article/view/783/784> (in Russian).
 50. 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).
 51. Kiryukhina L.D., Kameneva M.Yu., Novikova L.N. [Possibilities of impulsed oscillometry in diagnostics of a restrictive version of ventilation disorders]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017; (5): 136–141. DOI: 10.23670/IRJ.2017.59.032 (in Russian).
 52. Savushkina O.I., Chernyak A.V., Kameneva M.Yu. et al. [Informativeness of impulse oscillometry in the detection of restrictive type ventilation disorders]. *Bulleten' fiziologii i patologii dyhaniya*. 2018; (67): 8–16. DOI: 10.12737/article_5a9f258fe6d932.79474351 (in Russian).
 53. Semenova E., Kameneva M., Tishkov A. et al. Relationship between the impulse oscillometry parameters and the lung damage in idiopathic pulmonary fibrosis patients. *Eur. Respir. J.* 2013; 42 (Suppl. 57): 1284. Available at: https://erj.ersjournals.com/content/42/Suppl_57/P1284
 54. Fujii M., Shirai T., Mori K. et al. Inspiratory resonant frequency of forced oscillation technique as a predictor of the composite physiologic index in interstitial lung disease. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2015; 207: 22–27. DOI: 10.1016/j.resp.2014.12.009.
 55. Sugiyama A., Hattori N., Haruta Y. et al. Characteristics of inspiratory and expiratory reactance in interstitial lung disease. *Respir. Med.* 2013; 107 (6): 875–882. DOI: 10.1016/j.rmed.2013.03.005.

Received: September 30, 2023

Accepted for publication: November 16, 2023

Информация об авторах / Authors Information

Кирюхина Лариса Дмитриевна — к. м. н., заведующая отделением функциональной и ультразвуковой диагностики Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский институт пульмонологии» Федерального медико-биологического агентства; ведущий научный сотрудник, 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 Federal State Budgetary Institution "Pulmonology Scientific Research Institute" under Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation; Leading Researcher, Head of the Research Laboratory of Functional research, Saint-Petersburg State Research Institute of Phthisiopulmonology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 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>)

Черняк Александр Владимирович — к. м. н., заведующий лабораторией функциональных и ультразвуковых методов исследования Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский институт пульмонологии» Федерального медико-биологического агентства; врач функциональной диагностики отделения функциональной и ультразвуковой диагностики Государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Городская клиническая больница имени Д.Д.Плетнева Департамента здравоохранения города Москвы»; тел.: (495) 395-63-93; e-mail: achi2000@mail.ru (SPIN-код: 9328-6440; Author ID: 687383; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2001-5504>)

Alexander V. Cherniak, Candidate of Medicine, Head of Laboratory of Functional and Ultra-sound Investigations, Federal State Budgetary Institution "Pulmonology Scientific Research Institute" under Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation; Physician of Functional Diagnostics, Department of Functional and Ultrasound Diagnostics, State Budgetary Healthcare Institution D.D.Pletnev City Clinical Hospital, Healthcare Department of Moscow; tel.: (495) 395-63-93; e-mail: achi2000@mail.ru (SPIN: 9328-6440; Author ID: 687383; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2001-5504>)

Участие авторов

Кирюхина Л.Д. — анализ и интерпретация литературных данных, написание и редактирование текста

Черняк А.В. — анализ и интерпретация литературных данных, написание и редактирование текста

Оба автора внесли существенный вклад в проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию до публикации, несут ответственность за целостность всех частей статьи.

Authors Contribution

Kiryukhina L.D. — analysis and interpretation of literary data, writing and editing the text

Chernyak A.V. — analysis and interpretation of literary data, writing and editing the text

Both authors made significant contributions to the search, analysis, and preparation of the article, read and approved the final version before publication, and are responsible for the integrity of all parts of the article.