

Спектральная туссофонобарография – метод контроля над эффективностью лечения кашля у больных COVID-19

А.В.Будневский¹, С.Н.Авдеев², Е.С.Овсянников¹, С.Н.Фейгельман¹ ✉

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н.Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации: 394036, Россия, Воронеж, ул. Студенческая, 10

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М.Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет): 119991, Россия, Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Резюме

Сухой кашель, который необходимо лечить противокашлевыми средствами, является одной из самых частых жалоб пациентов при COVID-19. Контролировать эффективность назначенной терапии можно при помощи опросников и спектрального анализа звуков кашля. **Целью** исследования явилась оценка возможности использования спектральной туссофонобарографии (СТФБГ) как метода контроля над эффективностью лечения кашля у больных COVID-19. **Материалы и методы.** В исследовании приняли участие больные COVID-19 ($n = 60$: 45 % – мужчины, 55 % – женщины; средний возраст – 38,6 (30,1; 49,6) года). Основную группу составили пациенты с легким или среднетяжелым течением заболевания и активными жалобами на кашель. Лечение заболевания проводилось в соответствии с клиническими рекомендациями, также использовались противокашлевые средства. Кашель на 1-й и 8-й день терапии исследовался при помощи визуальной аналоговой шкалы и СТФБГ, затем сравнивался с индуцированным кашлем у здоровых лиц, составивших группу сравнения ($n = 30$: 43,3 % – мужчины, 56,7 % – женщины; средний возраст – 36,3 (28,4; 44,8) года). Записи кашля подвергались алгоритму быстрого преобразования Фурье. Оценивались следующие характеристики кашля: продолжительность (мс), отношение энергии низких и средних частот (60–600 Гц) к энергии высоких частот (600–6 000 Гц), частота максимальной энергии звука (Гц). Производилась оценка не только кашлевого акта в целом, но и отдельно каждой фазы. **Результаты.** На 8-й день лечения выявлены достоверные изменения характеристик кашля по сравнению с 1-м днем, в особенности II фазы кашлевого акта. Повысилась продолжительность кашля ($T = 355,0$ (276,0; 407,5) – в 1-й день; $T(c) = 432,0$ (386,0; 556,0) – на 8-й день; $p = 0,0000$), начали преобладать более низкие частоты ($Q = 0,281$ (0,2245; 0,408) – в 1-й день; $Q(c) = 0,4535$ (0,3725; 0,619) – на 8-й день; $p = 0,0000$), снизилась частота максимальной энергии звука ($F_{\max} = 488,5$ (282,0; 1220,5) – в 1-й день; $F_{\max} = 347,0$ (253,0; 488,0) – на 8-й день; $p = 0,0064$). После сравнения исследуемых параметров на 8-й день лечения с таковыми у здоровых лиц статистически значимых различий не обнаружено. **Заключение.** При помощи СТФБГ выявлено, что на фоне лечения COVID-19 характеристики звуков кашля приблизились к таковым у здоровых лиц.

Ключевые слова: COVID-19, сухой кашель, спектральный анализ звуков кашля, спектральная туссофонобарография.

Конфликт интересов. Конфликт интересов авторами не заявлен.

Финансирование. Спонсорская и финансовая поддержка работы отсутствовала.

Этическая экспертиза. Исследование проводилось в соответствии с принципами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации. У каждого участника получено письменное информированное согласие на участие в исследовании.

© Будневский А.В. и соавт., 2025

Для цитирования: Будневский А.В., Авдеев С.Н., Овсянников Е.С., Фейгельман С.Н. Спектральная туссофонобарография – метод контроля над эффективностью лечения кашля у больных COVID-19. *Пульмонология*. 2025; 35 (1): 42–48. DOI: 10.18093/0869-0189-2024-4422

Spectral tussophonobarography as a method for monitoring the effectiveness of cough treatment in patients with COVID-19

Andrey V. Budnevsky¹, Sergey N. Avdeev², Evgeniy S. Ovsyannikov¹, Sofia N. Feigelman¹ ✉

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “N.N.Burdenko Voronezh State Medical University” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation: ul. Studencheskaya 10, Voronezh, 394622, Russia

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M.Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University): ul. Trubetskaya 8, build. 2, Moscow, 119991, Russia

Abstract

Dry cough is one of the most common complaints of patients with COVID-19, so it must be treated with antitussives. The effectiveness of prescribed therapy can be controlled by using questionnaires and spectral analysis of cough sounds. **The aim** was to assess the use of spectral tussophonobarography for monitoring the effectiveness of cough treatment in patients with COVID-19. **Methods.** The main group consisted of 60 patients with COVID-19 (45% men, 55% women, average age 38.6 (30.1; 49.6) years) with mild or moderate severity and strong complaints of cough. The disease was treated in accordance with clinical recommendations, and antitussives were also used. Cough on the 1st and 8th days of therapy was studied using a visual analogue scale and spectral tussophonobarography, then compared with the induced cough of 30 healthy individuals making up the comparison

group (43.3% men and 56.7% women; average age of 36.3 (28.4; 44.8) years). Cough recordings were subjected to a fast Fourier transform algorithm. The following cough characteristics were assessed: duration (ms), ratio of low and medium frequency energy (60 – 600 Hz) to high frequency energy (600 – 6000 Hz), and frequency of maximum sound energy (Hz). Not only of the coughing act as a whole was assessed, but also of each phase separately. **Results.** On the 8th day of treatment, significant changes in cough characteristics were seen compared to the 1st day, especially in the 2nd phase of the cough act. The duration of cough increased ($T = 355.0$ (276.0; 407.5) – on the 1st day; $T(c) = 432.0$ (386.0; 556.0) – on the 8th day; $p = 0.0000$), lower frequencies began to predominate ($Q = 0.281$ (0.2245; 0.408) – on the 1st day; $Q(c) = 0.4535$ (0.3725; 0.619) – on the 8th day; $p = 0.0000$), the frequency of maximum sound energy decreased ($F_{\max} = 488.5$ (282.0; 1220.5) – on the 1st day; $F_{\max} = 347.0$ (253.0; 488.0) – on the 8th day; $p = 0.0064$). No statistically significant differences were found in the studied parameters on the 8th day of treatment as compared with those in healthy individuals. **Conclusion.** Spectral tussophonobarography revealed that characteristics of cough sounds during treatment of COVID-19 were close to those of healthy individuals.

Key words: COVID-19, dry cough, spectral analysis of cough sounds, spectral tussophonobarography.

Conflict of interest. The authors report that there is no conflict of interest.

Funding. There was no sponsorship or financial support for the article.

Ethical review. The study was conducted in accordance with the principles of the Helsinki Declaration of the World Medical Association. Each participant gave written informed consent to participate in the study.

© Budnevsky A.V. et al., 2025

For citation: Budnevsky A.V., Avdeev S.N., Ovsyannikov E.S., Feigelman S.N. Spectral tussophonobarography as a method for monitoring the effectiveness of cough treatment in patients with COVID-19. *Pul'monologiya*. 2025; 35 (1): 42–48 (in Russian). DOI: 10.18093/0869-0189-2024-4422

Новая коронавирусная инфекция COVID-19 (*COroNaVIrus Disease 2019*) – это острое респираторное заболевание преимущественно верхних отделов дыхательных путей, вызываемое РНК-вирусом SARS-CoV-2, принадлежащим к семейству *Coronaviridae*, подроду *Sarbecovirus*. SARS-CoV-2 является 7-м зарегистрированным коронавирусом после 229E, NL63, OC43, HKU1, MERS-CoV и предыдущего SARS-CoV. Впервые данный вирус выявлен в Китае, а первая вспышка заболевания зарегистрирована Всемирной организацией здравоохранения 31.12.19 [1]. Клиническая картина заболевания варьируется от бессимптомного носительства до крайне тяжелого течения, приводящего к летальному исходу. Наиболее характерными симптомами являются кашель, лихорадка, миалгия, anosmia, ageusia, боли в горле, головная боль, озноб, тошнота, рвота, диарея. Кашель является одним из самых частых поводов обращения к врачу, т. к. доставляет пациенту выраженный дискомфорт. При COVID-19 кашель чаще сухой, а при развитии пневмонии может приобретать продуктивный компонент [2].

В настоящее время в арсенале практикующего врача имеется не так уж много способов оценки кашля. Чаще всего речь идет о расспросе самого больного или его родственников, используются специально разработанные опросники и шкалы, например: визуальная аналоговая шкала (ВАШ), 6-балльная шкала оценки дневного и ночного кашля (*Leicester Cough Questionnaire* – LCQ) и вопросник качества жизни, связанного с кашлем (*Cough Specific Quality of Life Questionnaire* – CQLQ). Данные методы являются довольно субъективными, поэтому имеется необходимость в разработке объективных способов диагностики кашля.

Происхождение кашлевых звуков до сих пор окончательно не установлено. В кашле участвуют все структуры гортани, а вместе с резонансом носовой и грудной полости кашель приобретает индивидуальный тон. J.Korpas et al. изучено происхождение звуков кашля, при этом сделано предположение, что их характер зависит от патологических процессов в респираторном тракте. Возникновение звуков кашля

объясняется вибрацией дыхательных путей и легочных структур в турбулентном потоке воздуха. Характер кашлевого звука, наблюдаемый при патологических состояниях, зависит от измененной скорости потока воздуха в бронхах, а также от резонанса дыхательных путей и окружающей легочной ткани. Кроме того, на характер звуков кашля оказывают влияние наличие секрета и его реологические свойства. Податливость бронхов, возможно, также играет важную роль. При повышении податливости вовлекается большее количество бронхов в фазе вдоха, а на выдохе увеличивается их компрессия. Любые патологические процессы в бронхиальном дереве будут оказывать влияние на прохождение воздуха по дыхательным путям, при этом будет меняться и звук кашля, что может играть важную роль в диагностике и контроле над эффективностью лечения [3, 4].

При COVID-19 кашель чаще сухой, связан с гиперреактивностью кашлевых рецепторов бронхов. Он может беспокоить пациентов еще в течение нескольких недель и даже месяцев после выздоровления, доставляя выраженный дискомфорт, при этом необходимо проведение противокашлевой терапии при помощи препаратов центрального или периферического действия. Контролировать эффективность лечения можно при помощи опросников и спектрального анализа звуков кашля.

Целью исследования явилась оценка возможности использования спектрального анализа звуков кашля в качестве метода контроля над эффективностью лечения COVID-19.

Материалы и методы

Для проведения исследования отобраны пациенты ($n = 60$: 45 % – мужчины, 55 % – женщины; средний возраст – 38,6 (30,1; 49,6) года) с подтвержденным при помощи полимеразной цепной реакции COVID-19 легкого или среднетяжелого течения, с поражением легочной паренхимы по данным компьютерной томографии < 25 % и активными жалобами на сухой кашель. Сопутствующая респираторная патология

отсутствовала. Лечение COVID-19 назначалось в соответствии с клиническими рекомендациями [5], а для лечения сухого кашля использовалось противокашлевое средство периферического действия леводропропизин по 10 мл 3 раза в день с промежутками ≥ 6 ч. В качестве группы сравнения выбраны здоровые лица ($n = 30$: 43,3 % — мужчины, 56,7 % — женщины; средний возраст — 36,3 (28,4; 44,8) года). Противопоказаний к применению лекарственных средств, используемых в исследовании, ни у одного из пациентов не выявлено.

Временно-частотные параметры звуков кашля оценивались при помощи спектральной туссофнобарографии (СТФБГ) — объективного и высокочувствительного метода анализа звуковых записей, основанного на алгоритме быстрого преобразования Фурье. У каждого обследуемого пациента звуки кашля регистрировались при помощи микрофона трансформаторного типа с полосой пропускания 60–24 000 Гц. Все пациенты были предварительно проинструктированы о правильном выполнении кашлевого маневра (необходимо было кашлять с определенной силой). Таким образом была достигнута примерно одинаковая величина амплитуды звука. К столу, за который усаживался обследуемый, был прикреплен специально разработанный кронштейн, обеспечивающий расположение микрофона на расстоянии 15–20 см от лица. Также для устранения лишних окружающих шумов и минимизации наложения звуков были использованы фильтры с полосой пропускания 60–6 000 Гц.

При наличии самопроизвольного кашля производилась регистрация кашлевого эпизода, однако в случае отсутствия такового (у здоровых лиц) проводилась его провокация при помощи ингаляций лимонной кислоты в концентрации до 20 г / л [6].

Цифровая обработка полученных записей осуществлялась в компьютерной программе *Sound Forge 15* (MAGIX Software GmbH, Германия). Каждый

кашлевой каскад был разделен на отдельные кашлевые эпизоды, а они в свою очередь — на III фазы в соответствии с биомеханикой кашлевого рефлекса, причем первоначальное снижение амплитуды звука на ≥ 50 % в пределах 20 мс соответствовало переходу между I и II фазой, а ее последующее повышение на ≥ 50 % в пределах 20 мс — переходу между II и III фазой (рис. 1). Во всех звуковых записях также произведена нормализация громкости до 6 дБ и установка определенной частоты сэмплирования, а именно — 48 000 Гц.

Фазы кашлевого акта:

- I — глубокий вдох, открытие голосовой щели;
- II — закрытие голосовой щели, сокращение экспираторных мышц, что способствует значительному повышению внутригрудного и внутрибрюшного давления (вплоть до 250–300 мм рт. ст.) с последующим резким толчкообразным выдохом;
- III — закрытие голосовой щели, возникновение характерного звука связано с вибрацией голосовых связок.

При помощи алгоритма быстрого преобразования Фурье, позволяющего распределить звуковую энергию по частотам, были определены следующие спектральные характеристики звукового сигнала:

- продолжительность (T , мс);
- коэффициент Q (отношение энергии низких и средних частот (60–600 Гц) к энергии высоких частот (600–6 000 Гц));
- частота максимальной энергии звука ($F_{\max}$, Гц).

Также производился спектральный анализ звука и кашлевого акта в целом и каждой его фазы в отдельности.

Оценивался кашель до начала лечения и на 8-й день терапии, после чего сравнивался с индуцированным кашлем у здоровых лиц. Помимо СТФБГ, для оценки интенсивности кашля использовалась ВАШ, где пациент должен был оценивать выраженность сво-

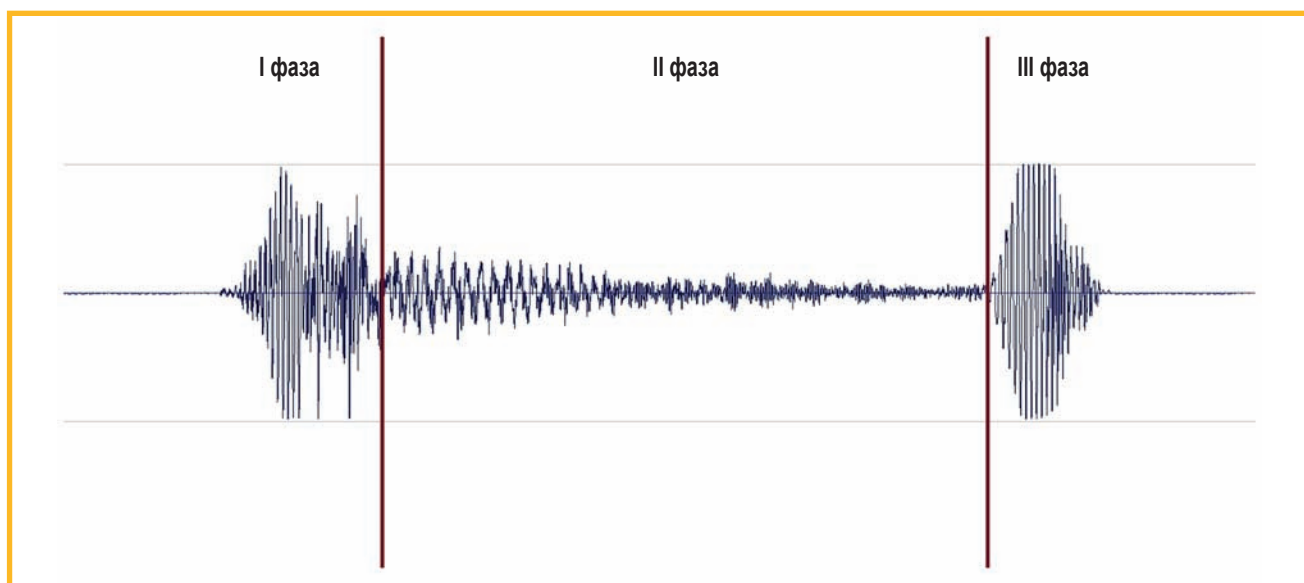


Рис. 1. Визуальное разделение аудиогаммы кашля на фазы
Figure 1. Visual separation of the cough audiogram into phases

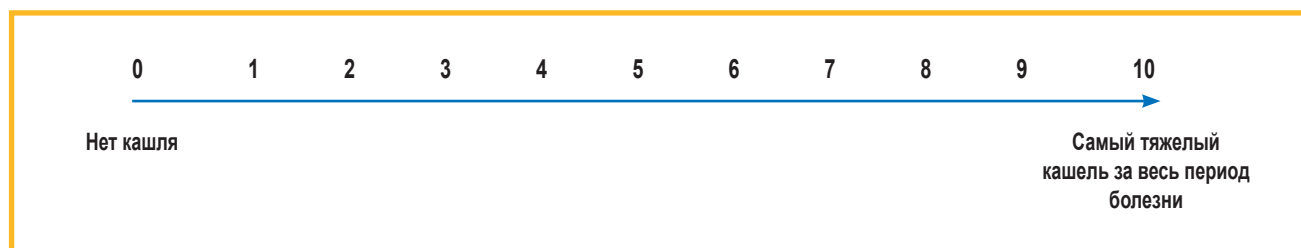


Рис. 2. Визуальная аналоговая шкала оценки интенсивности кашля
Figure 2. Visual analogue scale for assessing cough intensity

его кашля в баллах от 0 до 10. Чем больше баллов, тем субъективно тяжелее больной переносил кашель (рис. 2). Также обследуемые должны были сообщать о возникновении у них нежелательных побочных реакций.

Математическая и статистическая обработка данных осуществлялась с помощью пакета программ *Statgraphics Centurion XV* (*Statgraphics Technologies, Inc.*, США). Соответствие выборки распределению Гаусса оценивалось по коэффициенту эксцесса и асимметрии. Полученные значения оказались за пределами интервала от -2 до $+2$, следовательно, распределение данных не соответствовало нормальному. Численные показатели параметров кашля были представлены в виде медианы, в скобках указывались верхний и нижний квартили. Сравнение спектральных показателей кашля на 1-м и 2-м визитах осуществлялось при помощи критерия Уилкоксона, на 2-м визите и у здо-

ровых лиц — при помощи критерия Манна–Уитни. Различия считались статистически значимыми при показателе $p < 0,05$.

Результаты

Показатели спектрального анализа кашля на 1-й и 8-й день исследования больных COVID-19 и здоровых лиц представлены в таблице.

Продолжительность кашля в целом (T) и отдельно во II (T_2) и III (T_3) фазах достоверно увеличилась у больных COVID-19 на 2-м визите, т. е. на 8-й день лечения. В I фазе (T_1) статистически значимых различий не выявлено. Коэффициент Q на 8-й день исследования также был достоверно выше во всем кашлевом акте (Q) и во II (Q_2) и III (Q_3) фазах, что означает снижение частотности звука. При I фазе (Q_1) данный показатель достоверно не различался. Частота

Таблица
Динамика изменений показателей спектрального анализа звуков кашля у больных COVID-19 в течение 8-дневного курса терапии
Table
Dynamics of spectral analysis parameters of cough sounds of patients with COVID-19 during an 8-day treatment course

Параметр	Основная группа (n = 60)		Здоровые лица (n = 30)
	V_1	V_2	
T , мс	355,0 (276,0; 407,5)	432,0 (386,0; 556,0)*	411,5 (335,0; 503,0)
T_1 , мс	45,5 (36,0; 59,0)	45,5 (37,5; 54,0)	44,0 (38,0; 47,0)
T_2 , мс	257,0 (212,0; 303,0)	302,5 (243,5; 411,5)*	285,5 (241,0; 424,0)
T_3 , мс	82,0 (58,0; 108,0)	103,5 (72,0; 133,0)*	89,0 (67,5; 107,0)**
Q	0,281 (0,2245; 0,408)	0,4535 (0,3725; 0,619)*	0,432 (0,383; 0,501)
Q_1	0,4735 (0,2895; 0,7965)	0,4565 (0,329; 0,7415)	0,463 (0,289; 0,698)
Q_2	0,1925 (0,105; 0,285)	0,295 (0,2225; 0,414)*	0,297 (0,236; 0,436)
Q_3	0,663 (0,309; 1,258)	1,0065 (0,7745; 1,2115)*	0,993 (0,738; 1,226)
$F_{\max 1}$, Гц	488,5 (282,0; 1220,5)	347,0 (253,0; 488,0)*	314,0 (261,0; 394,0)
$F_{\max 1^1}$, Гц	334,5 (257,0; 523,5)	397,5 (266,5; 555,0)	454,5 (324,0; 576,0)
$F_{\max 2^2}$, Гц	1006,5 (478,0; 1504,0)	524,0 (232,5; 706,5)*	476,0 (322,0; 827,0)
$F_{\max 3^3}$, Гц	273,0 (160,0; 358,0)	318,5 (226,0; 431,5)	331,0 (216,0; 473,0)

Примечание: V_1 – 1-й визит (1-й день); V_2 – 2-й визит (8-й день); T , T_1 , T_2 , T_3 – продолжительность кашлевого эпизода в целом, I, II и III фазы соответственно; Q , Q_1 , Q_2 , Q_3 – отношение энергии низких и средних частот (60–600 Гц) к энергии высоких частот (600–6 000 Гц) кашлевого эпизода в целом, I, II и III фазы соответственно; $F_{\max}$, $F_{\max 1^1}$, $F_{\max 2^2}$, $F_{\max 3^3}$ – частота максимальной энергии звука кашлевого эпизода в целом, I–III фазы соответственно; * – достоверные изменения ($p < 0,05$) спектральных характеристик кашля больных COVID-19 на 8-й день исследования; ** – достоверные различия ($p < 0,05$) спектральных характеристик кашля между больными COVID-19 на 8-й день исследования и здоровыми лицами.

Note: V_1 – 1st visit (1st day); V_2 – 2nd visit (8th day); T , T_1 , T_2 , T_3 – duration of the whole cough episode and during the 1st, 2nd and 3rd phases, respectively; Q , Q_1 , Q_2 , Q_3 – the ratio of the energy of low and medium frequencies (60 – 600 Hz) to the energy of high frequencies (600 – 6,000 Hz) of the whole cough episode and during the I, II and III phases, respectively; $F_{\max}$, $F_{\max 1^1}$, $F_{\max 2^2}$, $F_{\max 3^3}$ – frequency of the maximum sound energy of the whole cough episode and during the 1st, 2nd and 3rd phases, respectively; *, Significant changes ($p < 0.05$) in the spectral characteristics of the cough of patients with COVID-19 on the 8th day of the study; **, Significant differences ($p < 0.05$) in the spectral characteristics of cough between patients with COVID-19 on the 8th day of the study and healthy individuals.

максимальной энергии звука также оказалась достоверно ниже в целом ($F_{\max}$) и во II фазе ($F_{\max 2}$) кашля на 8-й день исследования. Показатели I ($F_{\max 1}$) и III ($F_{\max 3}$) фаз достоверно не различались от таковых на 1-й день исследования.

Наиболее значимой в кашлевом акте является II фаза, т. к. именно она отвечает за прохождение воздуха по дыхательным путям, поэтому изменения данной фазы имеют наибольшую клиническую ценность.

Достоверных различий между больными COVID-19, получавшими лечение в течение 8 дней, и здоровыми лицами не выявлено. Статистически значимые различия наблюдались только в отношении продолжительности III фазы кашля, однако, во-первых, данная фаза не является постоянной (отсутствует у 10–20 % лиц вне зависимости от наличия или отсутствия той или иной патологии), а во-вторых, не несет клинической значимости, т. к. отвечает только за закрытие голосовой щели. Это означает, что назначенное лечение оказалось эффективным, показатели спектрального анализа приблизились к таковым у здоровых лиц. Интенсивность кашля по ВАШ снизилась с 4,0 (2,0; 6,0) в 1-й день исследования до 1,0 (0,0; 2,0), что доказывает эффективность проводимого лечения. Здоровые лица не предъявляли жалоб на кашель, поэтому у них выраженность кашля по ВАШ была сопоставима (0,0 (0,0; 1,0)). Нежелательных побочных реакций ни у одного из пациентов не выявлено.

Обсуждение

Впервые интерес к звукам дыхания возник еще в 1950-х годах. На рубеже 1970-х – 1980-х годов опубликованы некоторые сообщения по анализу звуков кашля. Основным методом анализа дыхательных шумов являлась фонография, т. е. сигнал интенсивности звука отображался во временной области, часто одновременно с сигналом воздушного потока (фонопневмография). Фонографическая запись кашля иногда называется туссофонографией [4].

Одним из способов изучения звуков кашля являлась оценка полосы интенсивности на нескольких уровнях частот. J. Korpas и J. Sadlonova–Korpasova установлено, что диапазоны частот при кашле охватывают 50–3 000 Гц; также обнаружены достоверные различия частотных характеристик у пациентов с бронхообструктивными заболеваниями дыхательных путей и у здоровых лиц. Также выявлено, что у здоровых лиц при произвольном кашле происходит усиление частот 300–500 Гц, в то время как у пациентов с хроническим бронхитом преобладают частоты 500, 700 и 1 200 Гц [7]. L.A. Debrezeni et al. отмечено, что средней частотой звука кашля здоровых лиц является 350 Гц, у больных бронхиальной астмой (БА) она несколько выше – около 500 Гц [8].

Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), который использовался и в данном исследовании, применяется для спектрального анализа звуков кашля еще с 1970-х годов. Анализ БПФ представляет собой математический алгоритм, который позволяет разделить сигнал на составляющие его частоты. При

спектральном анализе БПФ звуковой сигнал представляется в частотно-интенсивной шкале. По результатам БПФ-анализа нормальных звуков дыхания, влажного и сухого кашля показаны более высокие частоты спектров БПФ при произвольном кашле у пациентов с БА, хроническим бронхитом, бронхоальвеолярным раком легкого и параличом гортанного нерва по сравнению с таковыми при кашле у здоровых добровольцев [9].

СТФБГ (спектральный анализ звуков кашля – распределение энергии звуков кашля по диапазонам частот во времени) можно использовать в диагностических целях, т. к. данная методика достаточно информативна и обладает высоким профилем безопасности для пациента. По данным предыдущего исследования при помощи СТФБГ оценивались различия между спектральными характеристиками кашля у здоровых лиц и больных COVID-19. Выявлено, что звуки кашля при COVID-19 характеризуются меньшей продолжительностью и преобладанием энергии более высоких частот по сравнению с таковыми у здоровых индивидуумов, причем это относится как к кашлевому акту в целом, так и отдельно ко II фазе (именно она отвечает за прохождение воздуха по дыхательным путям). Следовательно, СТФБГ можно использовать в диагностике и дифференциальной диагностике COVID-19 [6].

СТФБГ использовалась Г.Г.Семенковой и соавт. для оценки обратимости бронхиальной обструкции у больных БА, которые были распределены на 2 группы – тяжелого ($n = 18$) и среднетяжелого ($n = 18$) течения. СТФБГ вместе с исследованием функции внешнего дыхания (спирометрия и пикфлоуметрия) проводилась до и после бронходилатационного теста с 400 мкг беротека. У пациентов достоверно снижалась продолжительность и частота кашлевого акта в целом и II фазы в отдельности. Именно II фаза отвечает за прохождение воздуха по суженным дыхательным путям во время скоростного выдоха у пациентов с БА [10].

По данным другого исследования Г.Г.Семенковой и соавт. при помощи СТФБГ и 24-часовой рН-метрии оценивалась взаимосвязь между гастроэзофагеальным рефлюксом и кашлем. Если одновременно (либо в пределах 5 мин до его возникновения) фиксировался кашлевой эпизод и снижение рН пищевода < 4 , считалось, что данный кашель является рефлюкс-индуцированным. Также рассчитывался симптомный индекс (SI) – отношение количества кашлевых эпизодов, связанных с рефлюксом, к общему количеству кашлевых эпизодов. Достоверным считался SI > 50 %. Данное явление наблюдалось у 87 из 107 обследованных, им назначалось лечение ингибиторами протонной помпы (омепразол) и прокинетики (домперидон) в течение 4 нед. в соответствии с актуальными на тот момент клиническими рекомендациями. У 49 из 87 пациентов терапия оказалась эффективной, но данные СТФБГ достоверно не менялись и соответствовали таковым у здоровых лиц. Однако у 38 пациентов, у которых терапия не оказала положительного эффекта, наблюдалась отрицательная

динамика — кашель приобрел продуктивный характер, а по данным СТФБГ выявлено несколько пиков в диапазонах до 500 Гц, которые регистрировались в начале II фазы [11].

S.Mootassim—Billah et al. использовался спектральный анализ кашля у пациентов с радиационной дисфагией (после лучевой терапии рака головы и шеи) для определения биомаркеров аспирации. Оценивались следующие звуковые параметры: продолжительность, контур амплитуды, энтропия выборки, эксцесс, также проводилось разложение относительной энергии кашлевого сигнала на несколько частотных диапазонов (0–400, 400–800, 800–1 600, 1 600–3 200 и > 3 200 Гц). Также оценивались качество глотания, изменение качества голоса и аэродинамические показатели кашля [12].

При помощи машинного обучения, основу которого составляет спектральный анализ кашля, *U.R.Abeyratne et al.* определяла пневмония у детей. «Золотым стандартом» для обучения классификатора считался клинический диагноз, установленный врачом-педиатром на основании только параметров, извлеченных из звуков кашля. Чувствительность и специфичность методики составила 94 и 75 % соответственно [13].

К сожалению, в настоящее время объективному исследованию кашля еще не уделяется должного внимания. Различные патологические изменения бронхолегочной системы способствуют нарушению прохождения воздушного потока по дыхательным путям во время кашля, что, соответственно, отражается на его звуке, при этом СТФБГ может найти широкое практическое применение в медицине. Подсчет кашлевых эпизодов важен для оценки эффективности противокашлевой терапии, поэтому ученые всего мира активно разрабатывают кашлевые мониторы, при помощи которых можно объективно оценивать кашель.

Заключение

Звуки, сопровождающие кашель, могут иметь важное диагностическое значение в клинической практике врача любой специальности, т. к. они отражают прохождение воздуха по дыхательным путям, наличие в них секрета, изменения резонанса и податливости бронхов и легочной паренхимы. Оценить спектральные характеристики звука, его частоту и продолжительность можно при помощи СТФБГ — неинвазивного метода регистрации и анализа звуков кашля. Ранее при помощи данного метода были выявлены характерные паттерны кашля у пациентов с COVID-19, в настоящем исследовании СТФБГ использовался для оценки эффективности лечения данного заболевания. На основе полученных результатов выявлено, что на 8-й день лечения продолжительность кашля и коэффициент Q увеличились, а частота максимальной энергии звука уменьшилась. После сравнения полученных данных со звуками кашля у здоровых лиц достоверно значимых различий не выявлено, что доказывает эффективность проводимого лечения. Следовательно, СТФБГ может использоваться в кли-

нической практике для диагностики и контроля над лечением различных заболеваний, в т. ч. COVID-19, т. к. является достаточно информативным методом и абсолютно безопасна для пациента.

Литература

1. Majumder J., Minko T. Recent developments on therapeutic and diagnostic approaches for COVID-19. *AAPS J.* 2021; 23 (1): 14. DOI: 10.1208/s12248-020-00532-2.
2. Raoult D., Zumla A., Locatelli F. et al. Coronavirus infections: epidemiological, clinical and immunological features and hypotheses. *Cell. Stress.* 2020; 4 (4): 66–75. DOI: 10.15698/cst2020.04.216.
3. Korpas J., Tomori Z. Cough and other respiratory reflexes. Progress in respiration research. Basel: Karger; 1979. Vol.12.
4. Piirilä P., Sovijärvi A.R. Objective assessment of cough. *Eur. Respir. J.* 1995; 8 (11): 1949–1956. DOI: 10.1183/09031936.95.08111949.
5. Министерство здравоохранения Российской Федерации. Временные методические рекомендации: Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Версия 18 (26.10.2023). Доступно на: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/064/610/original/%D0%92%D0%9C%D0%A0_COVID-19_V18.pdf [Дата обращения: 21.12.23].
6. Будневский А.В., Авдеев С.Н., Овсянников Е.С. и др. Спектральный анализ звуков кашля у больных COVID-19. *Пульмонология.* 2022; 32 (6): 834–841. DOI: 10.18093/0869-0189-2022-32-6-834-841.
7. Korpas J., Sadlonova-Korpasova J. Cough sound registration in men. *Folia Medica Martiniana.* 1984; 10 (1): 167–193.
8. Debrezeni L.A., Korpas J., Salat D. Spectral analysis of cough sounds recorded with and without a noseclip. *Bull. Eur. Physiopathol. Respir.* 1987; 23 (Suppl. 10): 57–61s.
9. Piirilä P., Sovijärvi A.R.A. Differences in acoustic and dynamic characteristics of spontaneous cough in pulmonary diseases. *Chest.* 1989; 96 (1): 46–53. DOI: 10.1378/chest.96.1.46.
10. Семенова Г.Г., Провоторов В.М., Сычев В.В. и др. Спектральная туссофонобарография — метод оценки обратимости бронхиальной обструкции у больных бронхиальной астмой. *Пульмонология.* 2003; (6): 32–36. Доступно на: <https://journal.pulmonology.ru/pulm/article/view/2589>
11. Семенова Г.Г., Провоторов В.М., Овсянников Е.С. Исследование кашля, вызванного гастроэзофагеальной рефлюксной болезнью, с применением методов туссографии и спектральной туссофонобарографии. *Пульмонология.* 2006; (6): 56–61. DOI: 10.18093/0869-0189-2006-6-56-61.
12. Mootassim-Billah S., Van Nuffelen G., Schoentgen J. et al. Assessment of radio (chemo) therapy-related dysphagia in head and neck cancer patients based on cough-related acoustic features: a prospective phase II national clinical trial (ACCOUGH-P/A trial). *Trials.* 2023; 24 (1): 619. DOI: 10.1186/s13063-023-07660-y.
13. Abeyratne U.R., Swarnkar V., Triasih R., Setyati A. Cough sound analysis — a new tool for diagnosing pneumonia. *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2013; 2013: 5216–5219. DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610724.

Поступила: 25.12.23
Принята к печати: 24.04.24

References

1. Majumder J., Minko T. Recent developments on therapeutic and diagnostic approaches for COVID-19. *AAPS J.* 2021; 23 (1): 14. DOI: 10.1208/s12248-020-00532-2.
2. Raoult D., Zumla A., Locatelli F. et al. Coronavirus infections: epidemiological, clinical and immunological features and hypotheses. *Cell. Stress.* 2020; 4 (4): 66–75. DOI: 10.15698/cst2020.04.216.
3. Korpas J., Tomori Z. Cough and other respiratory reflexes. Progress in respiration research. Basel: Karger; 1979. Vol.12.
4. Piirilä P., Sovijärvi A.R. Objective assessment of cough. *Eur. Respir. J.* 1995; 8 (11): 1949–1956. DOI: 10.1183/09031936.95.08111949.
5. Ministry of Health of the Russian Federation. [The temporary guidelines: Prevention, diagnosis and treatment of new coronavi-

- rus infection (COVID-19)]. Version 18 (October 26, 2023). Available at: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attachments/000/064/610/original/%D0%92%D0%9C%D0%A0_COVID-19_V18.pdf [Accessed: December 12, 2023] (in Russian).
6. Budnevsky A.V., Avdeev S.N., Ovsyannikov E.S. et al. [Spectral analysis of cough sounds in patients with COVID-19]. *Pul'monologiya*. 2022; 32 (6): 834–841. DOI: 10.18093/0869-0189-2022-32-6-834-841 (in Russian).
 7. Korpas J., Sadlonova-Korpasova J. Cough sound registration in men. *Folia Medica Martiniana*. 1984; 10 (1): 167–193.
 8. Debrezeni L.A., Korpas J., Salat D. Spectral analysis of cough sounds recorded with and without a noseclip. *Bull. Eur. Physiopathol. Respir*. 1987; 23 (Suppl. 10): 57–61s.
 9. Piirilä P., Sovijärvi A.R.A. Differences in acoustic and dynamic characteristics of spontaneous cough in pulmonary diseases. *Chest*. 1989; 96 (1): 46–53. DOI: 10.1378/chest.96.1.46.
 10. Semenkova G.G., Provotorov V.M., Sychev V.V. et al. [Spectral tussofoiobarography is a method for assessing the reversibility of bronchial obstruction in patients with bronchial asthma]. *Pul'monologiya*. 2003; (6): 32–36. Available at: <https://journal.pulmonology.ru/pulm/article/view/2589> (in Russian).
 11. Semenkova G.G., Provotorov V.M., Ovsyannikov E.S. [Study of cough caused by gastroesophageal reflux disease using tousography and spectral toussophonobarography methods]. *Pul'monologiya*. 2006; (6): 56–61. DOI: 10.18093/0869-0189-2006-6-56-61 (in Russian).
 12. Mootassim-Billah S., Van Nuffelen G., Schoentgen J. et al. Assessment of radio (chemo) therapy-related dysphagia in head and neck cancer patients based on cough-related acoustic features: a prospective phase II national clinical trial (ACCOUGH-P/A trial). *Trials*. 2023; 24 (1): 619. DOI: 10.1186/s13063-023-07660-y.
 13. Abeyratne U.R., Swarnkar V., Triasih R., Setyati A. Cough sound analysis – a new tool for diagnosing pneumonia. *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2013; 2013: 5216–5219. DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610724.

Received: December 25, 2023

Accepted for publication: April 24, 2024

Информация об авторах / Authors Information

Будневский Андрей Валериевич — д. м. н., профессор, заведующий кафедрой факультетской терапии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н.Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (473) 263-81-30; e-mail: budnev@list.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000000211712746>)

Andrey V. Budnevsky, Doctor of Medicine, Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Head of the Department of Faculty Therapy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “N.N.Burdenko Voronezh State Medical University” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; tel.: (473) 263-81-30; e-mail: budnev@list.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000000211712746>)

Авдеев Сергей Николаевич — д. м. н., профессор, академик Российской академии наук, заведующий кафедрой пульмонологии Института клинической медицины имени Н.В.Склифосовского Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М.Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; директор Национального медицинского исследовательского центра по профилю «Пульмонология»; тел.: (495) 708-35-76; e-mail: serg_avdeev@list.ru (SPIN-код: 1645-5524; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5999-2150>)

Sergey N. Avdeev, Doctor of Medicine, Professor, Academician of Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Pulmonology, N.V.Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M.Sechenov First Moscow State Medical

University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University); Chief Freelance Pulmonologist of the Ministry of Health of the Russian Federation; Director of the National Medical Research Center for Pulmonology; tel.: (495) 708-35-76; e-mail: serg_avdeev@list.ru (SPIN-code: 1645-5524; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5999-2150>)

Овсянников Евгений Сергеевич — д. м. н., профессор кафедры факультетской терапии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н.Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (473) 263-81-30; e-mail: ovses@yandex.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8545-6255>)

Evgeniy S. Ovsyannikov, Doctor of Medicine, Professor, Department of Faculty Therapy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “N.N.Burdenko Voronezh State Medical University” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; tel.: (473) 263-81-30; e-mail: ovses@yandex.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8545-6255>)

Фейгельман Софья Николаевна — ординатор кафедры факультетской терапии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н.Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (473) 263-81-30; e-mail: s.feygelman@gmail.com (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4128-6044>)

Sofia N. Feigelman, Resident, Department of Faculty Therapy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “N.N.Burdenko Voronezh State Medical University” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; tel.: (473) 263-81-30; e-mail: s.feygelman@gmail.com (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4128-6044>)

Участие авторов

Будневский А.В. — концепция и дизайн исследования, редактирование текста

Авдеев С.Н. — концепция и дизайн исследования, редактирование текста

Овсянников Е.С. — статистическая обработка, написание и редактирование текста

Фейгельман С.Н. — сбор и обработка материала, написание текста

Все авторы внесли существенный вклад в проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию до публикации.

Authors Contribution

Budnevsky A.V. — research concept and design, text editing

Avdeev S.N. — research concept and design, text editing

Ovsyannikov E.S. — statistical processing, text writing and editing

Feigelman S.N. — collecting and processing the material, text writing

All the authors made a significant contribution to the search, analysis, and preparation of the article, read and approved the final version before publication.