

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto630428>

Функциональная оценка тонких немиелинизированных нервных волокон у пациентов с кифосколиозом, ассоциированным с компрессией спинного мозга

А.Г. Назаренко, А.И. Крупаткин, А.А. Кулешов, И.М. Милица, М.С. Ветрилэ, И.Н. Лисянский, С.Н. Макаров

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Использование метода лазерной доплеровской флоуметрии со спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока позволяет оценить функциональное состояние тонких немиелинизированных нервных волокон и объективизировать динамику восстановительных процессов у пациентов с кифосколиотическими деформациями позвоночника, ассоциированными с компрессией спинного мозга.

Цель. Изучить особенности нейромикроциркуляторных взаимосвязей у пациентов с кифосколиозом, ассоциированным с неврологическим дефицитом, до и после оперативного лечения.

Материалы и методы. Обследованы с использованием метода ЛДФ и прооперированы 20 пациентов с деформациями позвоночника, ассоциированными с неврологическим дефицитом различной степени выраженности. Обследование пациентов проводилось до операции, через 1–2 недели после неё (после регресса острого послеоперационного болевого синдрома), через 3–6 месяцев, 6–12 месяцев и более года после операции. Объём исследования включал общий осмотр с подробной оценкой неврологического статуса, лучевую диагностику (постуральные рентгенограммы позвоночника, компьютерную и магнитно-резонансную томографию позвоночника с оценкой стеноза позвоночного канала). Пациентам с грубыми кифосколиотическими деформациями проводилась КТ-миелография с последующим проектированием индивидуальных полноразмерных 3D-моделей позвоночника и миелорадикулярных структур из пластика. На всех сроках обследования была проведена ЛДФ с вейвлет-анализом. Исследование перфузии с определением среднего показателя микроциркуляции проводилось на уровне подушечки дистальной фаланги большого пальца стопы с использованием двухканального аппарата ЛАКК-02 с полупроводниковым лазером (зондирование в красном и инфракрасном канале). Полученные результаты ЛДФ обрабатывались методом спектрального амплитудно-частотного вейвлет-анализа для характеристики факторов регуляции микроциркуляции в диапазонах симпатической адренергической регуляции (0,02–0,046 Гц), сенсорных пептидергических влияний (0,047–0,069 Гц), миогенных осцилляций (0,07–0,145 Гц).

Результаты. После операции возрастала и поддерживалась активность трофотропных сенсорных пептидергических нервных волокон, величины перфузии микроциркуляторного русла, начиная с раннего послеоперационного периода. Эрготропная симпатическая адренергическая активность значительно снижалась в период 6–12 месяцев после операции. Максимальная мобилизация трофотропных нейрогенных механизмов саногенеза отмечалась в период 6–12 месяцев после операции.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о значимом участии тонких нервных волокон в восстановительных процессах после декомпрессивных операций в зоне позвоночного канала и создания анатомических условий для нейрофизиологической репарации на уровне спинного мозга. Использование метода ЛДФ со спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока позволяет объективизировать динамику состояния тонких немиелинизированных нервных волокон и восстановительных процессов у пациентов с кифосколиотическими деформациями позвоночника, ассоциированными с компрессией спинного мозга.

Ключевые слова: кифоз; сколиоз; неврологический дефицит; лазерная доплеровская флоуметрия; микроциркуляция; вейвлет-анализ.

Как цитировать:

Назаренко А.Г., Крупаткин А.И., Кулешов А.А., Милица И.М., Ветрилэ М.С., Лисянский И.Н., Макаров С.Н. Функциональная оценка тонких немиелинизированных нервных волокон у пациентов с кифосколиозом, ассоциированным с компрессией спинного мозга // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 295–304. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto630428>

Рукопись получена: 17.04.2024

Рукопись одобрена: 24.04.2024

Опубликована online: 17.07.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto630428>

Neuro-microcirculatory interrelationships in patients with kyphoscoliosis associated with neurological deficits

Anton G. Nazarenko, Alexander I. Krupatkin, Alexander A. Kuleshov, Igor M. Militsa, Marchel S. Vetrile, Igor N. Lisyansky, Sergey N. Makarov

N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The use of laser Doppler flowmetry with spectral wavelet analysis of blood flow fluctuations allows us to assess the functional state of thin unmyelinated nerve fibers and objectify the dynamics of recovery processes in patients with kyphoscoliotic spinal deformities associated with spinal cord compression.

AIM: To study the features of neuromicrocirculatory relationships in patients with kyphoscoliosis associated with neurological deficits before and after surgical treatment.

MATERIALS AND METHODS: 20 patients with spinal deformities associated with neurological deficits of varying severity were examined using the LDF method and operated on. Patients were examined before surgery, 1–2 weeks after surgery following regression of acute postoperative pain syndrome, 3–6 months, 6–12 months, and more than a year after surgery. The scope of the study included a general examination with a detailed assessment of the neurological status, radiation diagnostics (postural radiographs of the spine, computed tomography and magnetic resonance imaging of the spine with assessment of spinal canal stenosis). Patients with severe kyphoscoliotic deformities underwent CT myelography followed by the design of individual full-size 3D plastic models of the spine and myeloradicular structures. LDF with wavelet analysis was carried out at all periods of the survey. A perfusion study with determination of the average microcirculation was carried out at the level of the pad of the distal phalanx of the big toe using a two-channel LAKK-02 device with a semiconductor laser (sensing in the red Raman and infrared IR channels). The obtained LDF results were processed by spectral amplitude-frequency wavelet analysis to characterize microcirculation regulation factors in the ranges of sympathetic adrenergic regulation (0.02–0.046 Hz), sensory peptidergic influences (0.047–0.069 Hz), myogenic oscillations (0.07–0.145 Hz).

RESULTS: After surgery, the activity of trophotropic sensory peptidergic nerve fibers, the values of perfusion of the microcirculatory channel increased and was maintained starting from the early postoperative period. Ergotropic sympathetic adrenergic activity was significantly decreased in the period of 6–12 months after surgery. Maximum mobilization of trophotropic neurogenic mechanisms of sanogenesis was observed in the period of 6–12 months after surgery.

CONCLUSION: The obtained data indicate a significant participation of thin nerve fibers in the recovery processes after decompressive surgeries in the spinal canal zone and the creation of anatomical conditions for neurophysiological repair at the spinal cord level. The use of the LDF method with spectral wavelet analysis of blood flow fluctuations makes it possible to objectify the dynamics of thin unmyelinated nerve fibers and recovery processes in patients with kyphoscoliotic deformities of the spine associated with spinal cord compression.

Keywords: kyphosis; scoliosis; neurological deficit; laser doppler flowmetry; microcirculation; wavelet analysis.

To cite this article:

Nazarenko AG, Krupatkin AI, Kuleshov AA, Militsa IM, Vetrile MS, Lisyansky IN, Makarov SN. Neuro-microcirculatory interrelationships in patients with kyphoscoliosis associated with neurological deficits. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):295–304. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto630428>

Received: 17.04.2024

Accepted: 24.04.2024

Published online: 17.07.2024

ОБОСНОВАНИЕ

Естественное течение деформаций позвоночника, таких как кифоз и сколиоз, может приводить к стенозу позвоночного канала и в дальнейшем — к компрессии сосудисто-нервных структур, в том числе спинного мозга. Методы визуализации, связанные с лучевой клинично-анатомической диагностикой [1], не дают количественных характеристик степени поражения и восстановления функции спинного мозга, а значит, оценки динамики неврологического статуса. В то же время при стенозе может изменяться весь функциональный спектр диагностических неврологических параметров — как состояния миелинизированных волокон типа А, так и тонких немиелинизированных С-волокон. Миелинизированные структуры связаны с выполнением специфических функций — движений и преимущественно глубокой чувствительности. Немиелинизированные симпатические и тонкие сенсорные волокна участвуют в реализации процессов адаптации, трофики, формирования программ патологического и саногенеза, болевых систем. Симпатическая активность сопутствует дистрофическим процессам, а реализация восстановительных процессов, саногенеза и выздоровления требует усиления функционального вклада сенсорных пептидергических нервных волокон [2]. Для оценки миелинизированных структур, в том числе при стенозирующих процессах позвоночника, применяются методы электронейромиографии (ЭНМГ) с определением наиболее диагностически значимых показателей — амплитуды потенциалов действия, параметров моторного и сенсорного ответа, скорости проведения импульса и F-волны [3], а также вызванных потенциалов (соматосенсорных, когнитивных и др.) [4]. Однако состояние тонких немиелинизированных и маломиелинизированных волокон практически не изучено; это связано в том числе с тем, что из-за низкой скорости проведения они недоступны для традиционного ЭНМГ-исследования. Тонкие волокна в конечностях представлены симпатическими вегетативными постганглионарными С-волоконками (вазомоторными, в меньшем количестве потовыделительными и др.) и сенсорными А-дельта- и С-волоконками болевой и температурной чувствительности (сенсорная функция, а также собственно трофическая функция, связанная с секрецией нейропептидов). Парасимпатическая иннервация в тканях конечностей практически отсутствует. В области вертебрологии имеются единичные работы, исследующие функцию тонких нервных волокон. Например, с помощью метода термографии показана диагностическая роль соматосимпатического рефлекса при дископатиях поясничного отдела позвоночника [5].

Лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) со спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока является неинвазивным методом оценки микроциркуляции, который получил широкое распространение [2, 6–9]. В амплитудно-частотном вейвлет-спектре ЛДФ записей

микрорегуляторных сигналов выявлено несколько характерных частотных интервалов в диапазоне от 0,005 до 2 Гц, каждый из которых связан со специфическим физиологическим воздействием, модулирующим состояние микроциркуляции кожи. Это обеспечивает уникальные возможности для неинвазивной оценки регуляции микроциркуляторно-тканевых систем. Среди них выделяют активные тонус-формирующие влияния (эндотелиальные, нейрогенные, миогенные) и пассивные, обусловленные изменением давления в микрососудах (кардиальные и дыхательные веноулярные) [2, 10]. Благодаря тому, что тонус-формирующие диапазоны 0,02–0,046 и 0,047–0,069 Гц связаны, соответственно, с симпатическими вазомоторными адренергическими и сенсорными пептидергическими влияниями на микрососуды, имеется возможность неинвазивной диагностики функционального состояния вазомоторной симпатической и сенсорной пептидергической иннервации [2, 10]. Впервые эта методика была предложена в 2004 году [10]. При анализе спектра колебаний перфузии микрососудов учитывают, что симпатические адренергические влияния и сопутствующие им ангиоспастические проявления являются эрготропными, а сенсорные пептидергические, миогенные и эндотелиальные влияния — трофотропными. Доминирование эрготропных факторов связано с дегенеративно-дистрофическими процессами, а преобладание трофотропных компонентов регуляции микроциркуляторно-тканевых систем способствует регенерации и восстановительным процессам [2].

Известно, что микроциркуляторно-тканевые системы одними из первых реагируют на начало саногенеза, в связи с чем использование показателей ЛДФ с вейвлет-анализом колебаний кровотока до и после операций на позвоночнике является перспективным для раннего выявления вектора функциональной динамики [2, 9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Выполнено моноцентровое когортное ретроспективное сравнительное исследование.

Критерии соответствия

В НИИЦ ТО им. Н.Н. Приорова были обследованы с использованием метода ЛДФ и прооперированы 20 пациентов с деформациями позвоночника, ассоциированными с неврологическим дефицитом различной степени выраженности. Из них 17 пациентов в возрасте до 18 лет ($13,9 \pm 2,6$ года), 3 пациента — взрослые. В группе детского возраста отмечалось 10 случаев идиопатического кифосколиоза IV степени с неврологическим статусом Frankel C (7 пациентов) и D (3 пациента), 7 случаев кифоза груднопоясничного отдела позвоночника, развившегося на фоне гипоплазии тел позвонков Th12-L1. У данной группы пациентов присутствовал стеноз позвоночного канала $54,1 \pm 19,1\%$, оцениваемый по данным компьютерной

(КТ) миелографии вершины деформации в сагиттальной плоскости. У пациентов взрослого возраста наблюдалась кифотическая деформация грудного и груднопоясничного отделов позвоночника. По данным обследований выявлен стеноз позвоночного канала $53,3 \pm 16,4\%$. Отмечался неврологический статус Frankel C (2 пациента) и D (1 пациент).

Условия проведения

Обследование пациентов проводилось до операции, через 1–2 недели после неё после регресса острого послеоперационного болевого синдрома, через 3–6 месяцев, 6–12 месяцев и более года после операции.

Способ медицинского вмешательства

Инструментальная коррекция и фиксация деформации без прямой декомпрессии позвоночного канала проведены у 7 пациентов. Двухэтапное оперативное лечение в объёме дорсальной стабилизации деформации позвоночника и передней декомпрессии позвоночного канала осуществлено у 10 человек. Заднебоковая декомпрессия позвоночного канала выполнена у 3 пациентов.

Методы регистрации исходов

Объём исследования включал общий осмотр с подробной оценкой неврологического статуса, лучевую

диагностику (постуральные рентгенограммы позвоночника, компьютерную и магнитно-резонансную томографию позвоночника с оценкой стеноза позвоночного канала). Пациентам с грубыми кифосколиотическими деформациями проводилась КТ-миелография с последующим проектированием индивидуальных полноразмерных 3D-моделей позвоночника и миелорадикулярных структур из пластика.

На всех сроках обследования была проведена ЛДФ с вейвлет-анализом (рис. 1–3). Исследование перфузии с определением среднего показателя микроциркуляции (М, в перфузионных единицах (п.е.)) проводилось на уровне подушечки дистальной фаланги большого пальца стопы с использованием двухканального аппарата ЛАКК-02 с полупроводниковым лазером (зондирование в красном и инфракрасном канале) [2, 9]. Полученные результаты ЛДФ обрабатывались методом спектрального амплитудно-частотного вейвлет-анализа для характеристики факторов регуляции микроциркуляции в диапазонах симпатической адренергической регуляции (0,02–0,046 Гц), сенсорных пептидергических влияний (0,047–0,069 Гц), миогенных осцилляций (0,07–0,145 Гц). Нормированная по среднеквадратичному отклонению (σ) максимальная средняя амплитуда осцилляций в каждом из диапазонов определялась по формуле A/σ , где A — величина амплитуды в п.е. согласно ранее описанной методике [2, 9] (рис. 1–3).

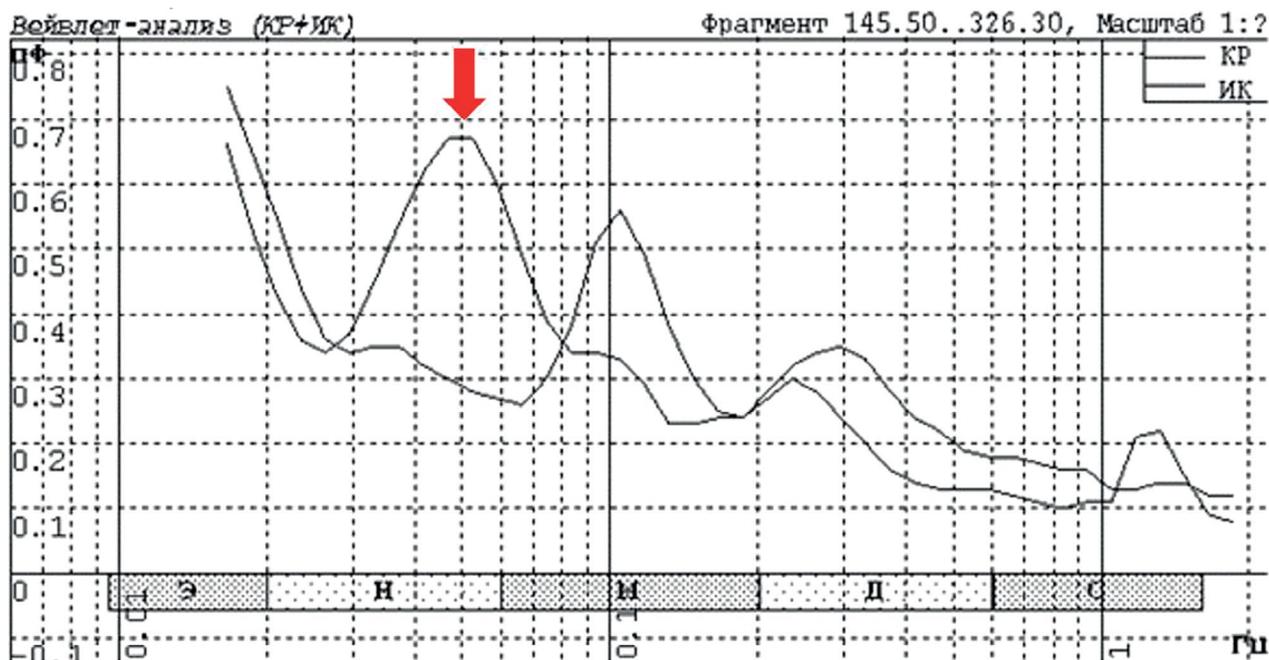


Рис. 1. Пример записи вейвлет-спектра колебаний кровотока по данным лазерной доплеровской флоуметрии до операции.

Примечание. По горизонтали — частотные диапазоны в Гц: э (эндотелиальные), н (нейрогенные), м (миогенные), д (дыхательные веноулярные), с (сердечные). По вертикали — амплитуда колебаний кровотока в перфузионных единицах. Красная стрелка — активация осцилляций в диапазоне симпатической адренергической регуляции микрососудов в инфракрасном канале. Сенсорная пептидергическая активность не зарегистрирована.

Fig. 1. An example of recording the wavelet spectrum of blood flow fluctuations according to laser Doppler flowmetry data before surgery.

Note. Horizontally — frequency ranges in Hz: э (endothelial), н (neurogenic), м (myogenic), д (respiratory venular), с (cardiac). Vertically — the amplitude of fluctuations in blood flow in perfusion units. The red arrow is the activation of oscillations in the range of sympathetic adrenergic regulation of microvessels in the infrared channel. Sensory peptidergic activity has not been recorded.

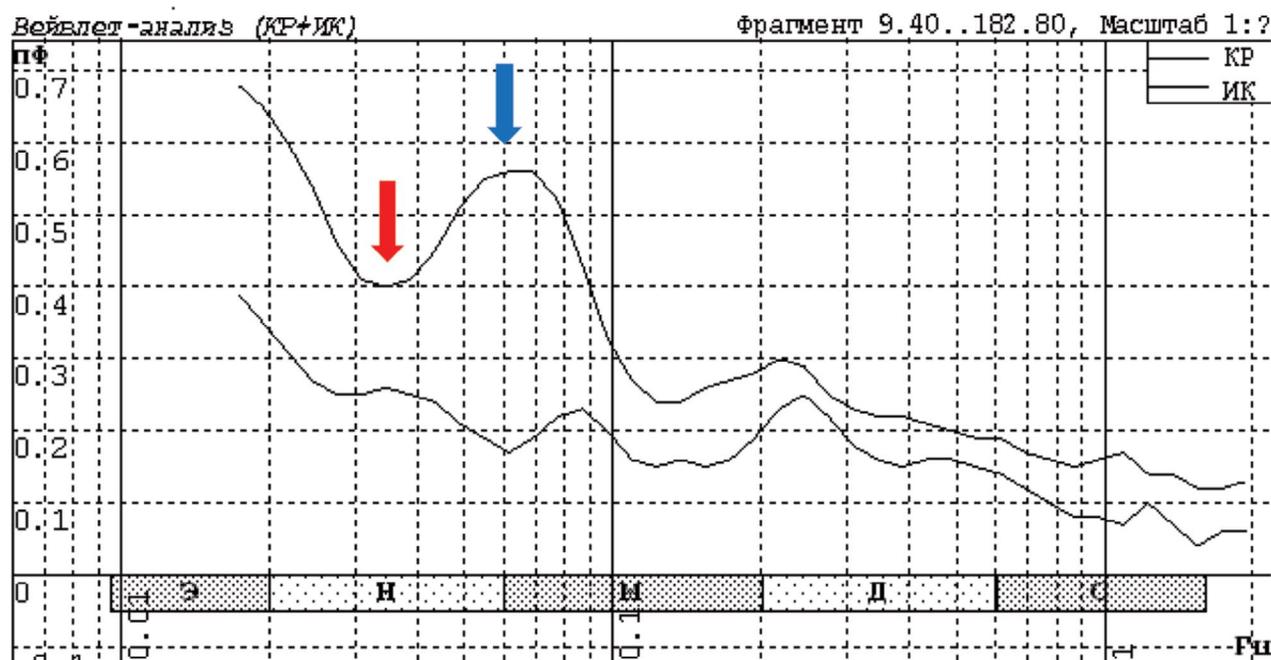


Рис. 2. Пример записи вейвлет-спектра колебаний кровотока по данным лазерной доплеровской флоуметрии через 8 месяцев после операции.

Примечание. По горизонтали — частотные диапазоны в Гц: э (эндотелиальные), н (нейрогенные), м (миогенные), д (дыхательные веноулярные), с (сердечные). По вертикали — амплитуда колебаний кровотока в перфузионных единицах. Красная стрелка — отсутствие симпатической адренергической активности в инфракрасном канале и выраженное её снижение в красном канале записи. Синяя стрелка — выраженная активность сенсорной пептидергической регуляции в инфракрасном канале записи.

Fig. 2. An example of recording the wavelet spectrum of blood flow fluctuations according to laser Doppler flowmetry 8 months after surgery.

Note. Horizontally — frequency ranges in Hz: э (endothelial), н (neurogenic), м (myogenic), д (respiratory venular), с (cardiac). Vertically — the amplitude of fluctuations in blood flow in perfusion units. The red arrow indicates the absence of sympathetic adrenergic activity in the infrared channel and its marked decrease in the red recording channel. The blue arrow indicates the pronounced activity of sensory peptidergic regulation in the infrared recording channel.

Статистический анализ

Статистическую обработку проводили с помощью программы Biostat 4.03, для сравнения двух выборок использовали критерий Манна–Уитни. Количественные данные представлялись как среднее значение ± стандартное отклонение.

Этическая экспертиза

Все манипуляции, выполненные в исследовании с участием людей, соответствовали стандартам локального этического комитета (заседание № 7 от 05 августа 2021 года), а также Хельсинкской декларации 1964 г. и более поздним поправкам к ней или сопоставимым этическим стандартам. Все пациенты (или их представители) подписывали информированное согласие на участие в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После проведённого оперативного лечения у пациентов в послеоперационном периоде относительная величина стеноза позвоночного канала составила $27,5 \pm 14,7\%$ (до операции — $54,1 \pm 19,1\%$). В динамике у 8 пациентов

с неврологическим статусом Frankel C (в виде нижнего смешанного глубокого парапареза) выявлена положительная динамика до Frankel D. Из 12 пациентов с дооперационным неврологическим статусом Frankel D у 7 человек динамика неврологического дефицита не выявлена, у 5 пациентов отмечался регресс неврологических расстройств до Frankel E. Результаты хирургического лечения пациентов расценены как хорошие. У 13 пациентов (65%) выявлен регресс неврологического дефицита в период наблюдения 3–6 месяцев после операции. Дельта коррекции деформации у данной группы лиц составила $29,3 \pm 12,1\%$.

Результаты исследования методом ЛДФ представлены на рис. 4 и в табл. 1.

Примеры записи вейвлет-спектра колебаний кровотока приведены на рис. 1–3.

Как следует из представленных данных, в процессе послеоперационного восстановления отмечалась отчётливая динамика функционального состояния тонких нервных волокон (рис. 4). В условиях физиологического покоя у здоровых лиц (контрольная группа) преобладала представленность симпатической адренергической регуляции, тогда как трофотропная сенсорная пептидергическая

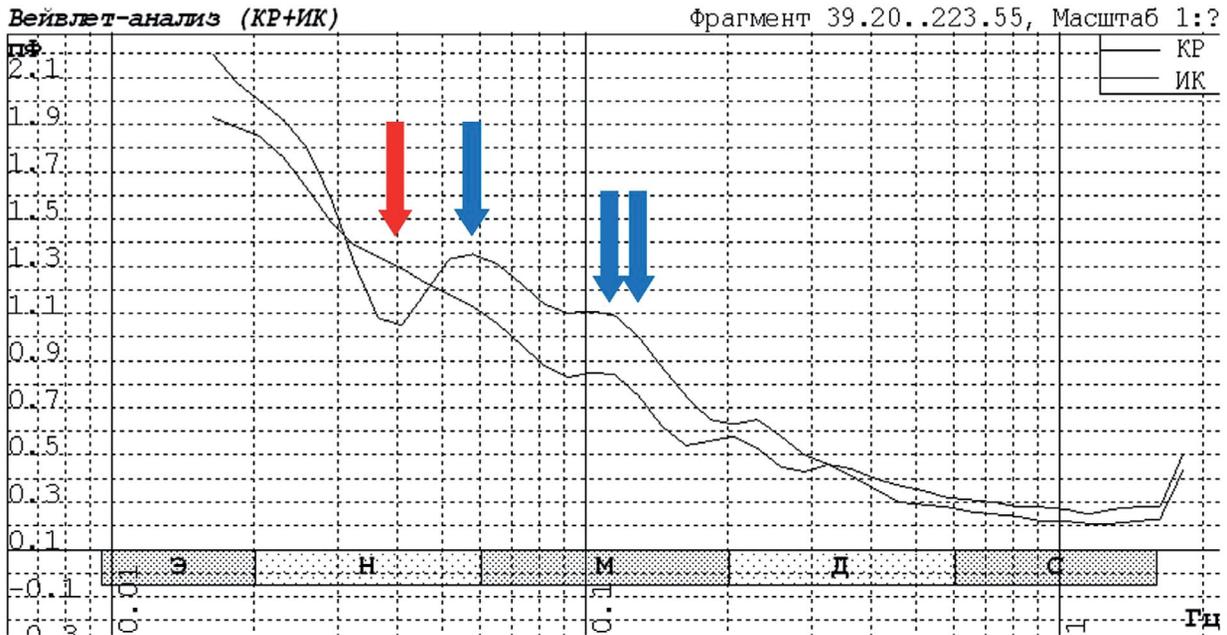


Рис. 3. Пример записи вейвлет-спектра колебаний кровотока по данным лазерной доплеровской флоуметрии через 1,5 года после операции.

Примечание. По горизонтали: частотные диапазоны в Гц — э (эндотелиальные), н (нейрогенные), м (миогенные), д (дыхательные веноулярные), с (сердечные). По вертикали — амплитуда колебаний кровотока в перфузионных единицах. Красная стрелка — отсутствие симпатической адренергической активности в красном и инфракрасном каналах записи. Синяя стрелка — активация сенсорной пептидергической регуляции в инфракрасном канале записи. Двойная синяя стрелка — синхронизация по частоте миогенной активности в красном и инфракрасном каналах.

Fig. 3. An example of recording the wavelet spectrum of blood flow fluctuations according to laser Doppler flowmetry 1.5 years after surgery.

Note. Horizontally: frequency ranges in Hz — э (endothelial), н (neurogenic), м (myogenic), д (respiratory venular), с (cardiac). Vertically — the amplitude of fluctuations in blood flow in perfusion units. The red arrow indicates the absence of sympathetic adrenergic activity in the red and infrared recording channels. The blue arrow is the activation of sensory peptidergic regulation in the infrared recording channel. The double blue arrow is the synchronization of the frequency of myogenic activity in the red and infrared channels.

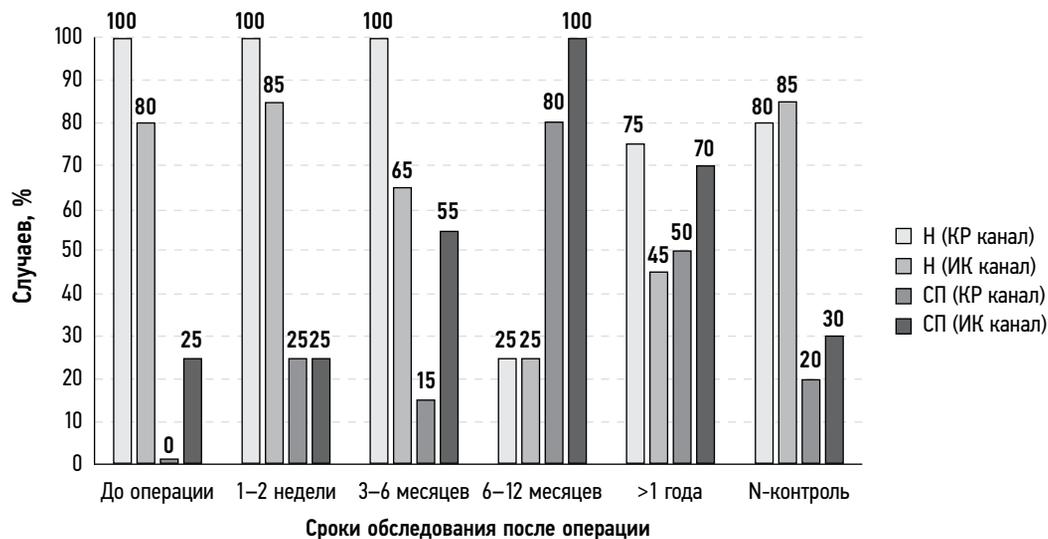


Рис. 4. Частота представленности активности симпатической адренергической и сенсорной пептидергической регуляции микрососудов в вейвлет-спектре колебаний кровотока, %.

Примечание. Н — симпатическая адренергическая регуляция микрососудов, СП — сенсорная пептидергическая регуляция микрососудов, КР — красный, ИК — инфракрасный.

Fig. 4. Frequency of activity of sympathetic adrenergic and sensory peptidergic regulation of microvessels in the wavelet spectrum of blood flow fluctuations, %.

Note. Н — sympathetic adrenergic regulation of microvessels, СП — sensory peptidergic regulation of microvessels, КР — red, ИК — infrared.

Таблица 1. Показатели лазерной доплеровской флоуметрии до и после оперативного лечения

Table 1. Indicators of laser Doppler flowmetry before and after surgical treatment

Интервал обследования	Ан./σ КР	Ан./σ ИК	Асп./σ КР	Асп./σ ИК	Ам./σ КР	Ам./σ ИК	М, п.е. КР	М, п.е. ИК
До операции	0,45±0,12	0,53±0,11	—	0,38±0,08	0,38±0,04	0,24±0,03	1,1±0,07	11,7±1,1
1–2 недели после операции	0,4±0,2	0,64±0,04*	0,57±0,12*	0,53±0,05*	0,41±0,09	0,3±0,08	2,3±0,05*	10±1,5
3–6 месяцев после операции	0,6±0,1	0,65±0,06*	0,41±0,08*	0,54±0,04*	0,39±0,07	0,19±0,1	2,34±0,04*	13±1,4
6–12 месяцев после операции	0,37±0,07*	0,44±0,06*	0,47±0,11*	0,43±0,04*	0,43±0,03*	0,28±0,05	5,4±0,09*	13±2,3
Более 1 года после операции	0,45±0,15	0,5±0,12	0,32±0,07*	0,54±0,12*	0,35±0,1	0,34±0,04*	7,2±1,1*	18,7±1,5*
Контроль (n=20)	0,4±0,09	0,48±0,1	0,27±0,1	0,29±0,1	0,45±0,07	0,4±0,03	5,1±0,09	11,8±1,3

Примечание. * — $p < 0,05$ для данных в динамике после операции по сравнению с дооперационными результатами, КР — красный канал, ИК — инфракрасный канал.

Note. * — $p < 0.05$ for data in dynamics after surgery compared with preoperative results, КР — red channel, ИК — infrared channel.

активность обнаруживалась в вейвлет-спектре не более чем в 30% случаев. У пациентов в дооперационном периоде это распределение сохранялось, но в прекапиллярных микрососудах (записи красного канала) сенсорная пептидергическая регуляция в вейвлет-спектре не была выявлена. После операции отмечалась прогрессирующая в динамике смена вектора нервного контроля микроциркуляторно-тканевых систем — отчётливое возрастание вклада трофотропной сенсорной пептидергической иннервации на фоне снижения представленности эрготропного симпатического адренергического канала регуляции. Наибольший трофотропный вклад наблюдался во временном промежутке 6–12 месяцев после операции, что позволяет расценивать его как наиболее активный восстановительный период.

Представляют интерес количественные показатели состояния микроциркуляции и её регуляции (табл. 1). Для дооперационного периода были характерны низкие величины перфузии (М, п.е.) микрососудистого русла в красном канале записи, отражающем преимущественно нутритивный кровоток, отсутствие трофотропных сенсорных пептидергических осцилляций в этом же канале записи, относительно низкие значения амплитуд миогенных колебаний кровотока, связанных с капиллярной перфузией. После операции выявлялась положительная динамика микрососудистых показателей. Значительный прирост демонстрировала величина М, особенно в красном канале записи. Возрастала и поддерживалась активность сенсорных пептидергических нервных волокон начиная с раннего послеоперационного периода. Симпатическая адренергическая активность значимо снижалась в период 6–12 месяцев после операции.

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе для оценки тонких немиелинизированных нервных волокон использовался метод лазерной доплеровской флоуметрии. ЛДФ широко применяется в современной фундаментальной и клинической медицине для оценки микроциркуляторно-тканевых систем. Например, только одна информационная база PubMed насчитывает около 12 000 публикаций по этой тематике в самых разных областях медицины. Преимуществами метода являются неинвазивность, абсолютная безвредность исследований, возможность неограниченного контроля в динамике, а для российских приборов серии ЛАКК — ещё и компьютерный количественный анализ записей с применением спектрального вейвлет-анализа колебаний кровотока. Количественный подход позволяет оценить факторы регуляции микроциркуляции, в том числе функциональное состояние участвующих в иннервации микрососудов тонких немиелинизированных нервных волокон — вазомоторных симпатических и сенсорных пептидергических. Это особенно ценно для травматологии и ортопедии, так как результаты ЛДФ характеризуют не только чисто сосудистый компонент трофики тканей, реализуемый на уровне микроциркуляции, но и состояние нервного компонента трофики, осуществляемого посредством тонких нервных волокон [2, 9]. В настоящее время такая возможность приобретает ещё большую значимость в связи с тем, что нейрофизиологическая диагностика в травматологии и ортопедии, в том числе в вертебрологии, основана на электрофизиологическом подходе с оценкой проводимости по миелинизированным нервным волокнам. Однако этот подход неэффективен для диагностики немиелинизированной иннервации.

Выбор в качестве зоны регистрации ЛДФ кожи подошвенной поверхности большого пальца стопы был обусловлен высокой плотностью немиелинизированных волокон, в том числе периваскулярно, в коже подошвенных и ладонных поверхностей у человека [9].

Согласно полученным результатам, нарастание вклада трофотропной сенсорной пептидергической регуляции начинает увеличиваться с 3–6 месяцев после операции, достигает максимума в сроки 6–12 месяцев и несколько снижается, но сохраняется через год и более после хирургического вмешательства. На этом фоне на всех этапах сохраняется участие эрготропного канала регуляции, связанного с симпатическими волокнами, однако их вклад в контроль микроциркуляторно-тканевых систем отчётливо снижался начиная с 6 месяцев после операции, достигая минимума в период 6–12 месяцев.

Среди количественных параметров микроциркуляции отчётливое прогрессирующее в динамике после операции демонстрировала величина средней перфузии M . В количественном выражении для случаев представленности в вейвлет-спектре активность трофотропного сенсорного пептидергического канала регуляции (величины нормированных амплитуд колебаний кровотока соответствующего генеза) значительно возростала после операции, а активность эрготропного симпатического канала (величины амплитуд осцилляций симпатического адренергического генеза) значительно снижалась только в сроки 6–12 месяцев после операции.

В целом полученные данные свидетельствуют о значимом участии тонких нервных волокон в восстановительных процессах после декомпрессивных операций в зоне позвоночного канала и создания анатомических условий для нейрофизиологической репарации на уровне спинного мозга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода ЛДФ со спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока позволяет объективизировать динамику состояния тонких немиелинизированных нервных волокон и восстановительных процессов у пациентов с кифосколиотическими деформациями позвоночника, ассоциированными с компрессией спинного мозга. После операции возростала и поддерживалась активность трофотропных сенсорных пептидергических нервных волокон, величины перфузии

микроциркуляторного русла начиная с раннего послеоперационного периода. Эрготропная симпатическая адренергическая активность значительно снижалась в период 6–12 месяцев после операции. Максимальная мобилизация трофотропных нейрогенных механизмов саногенеза отмечалась в период 6–12 месяцев после вмешательства.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: А.И. Крупаткин и И.М. Милица — сбор и анализ данных, написание текста статьи, анализ литературных источников; А.Г. Назаренко и А.А. Кулешов — написание и редактирование текста статьи; М.С. Ветрилэ, И.Н. Лисянский, С.Н. Макаров — редактирование текста статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Информированное согласие. Авторы получили письменное согласие пациента на публикацию его медицинских данных.

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). The greatest contribution is distributed as follows: A.I. Krupatkin and I.M. Militsa — data collection and analysis, writing the text of the article, analysis of literary sources; A.G. Nazarenko and A.A. Kuleshov — writing and editing the text of the article; M.S. Vetrile, I.N. Lisyansky, S.N. Makarov — editing the text of the article.

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Consent for publication. The patient gave his written consent for publication of his medical data.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alsaleh K., Alduhaish A. A limited unilateral transpedicular approach for anterior decompression of the thoracolumbar spinal cord in elderly and high-risk patients // *J Craniovertebr Junction Spine*. 2019. Vol. 10, № 2. P. 88–93. doi: 10.4103/jcvjs.JCVJS_20_19
2. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия. В кн.: *Функциональная диагностика: национальное руководство* / под ред. Н.Ф. Берестень, В.А. Сандрикова, С.И. Фёдоровой. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2019. С. 488–499.

3. Ипполитова Е.Г., Дамдинов Б.Б., Кошкарёва З.В., Верхозина Т.К. Электронейромиографические показатели у больных со стенозирующим процессом позвоночного канала на шейном уровне // *Acta Biomedica Scientifica*. 2020. Т. 5, № 5. С. 68–72. doi: 10.29413/ABS.2020-5.5.9
4. Адамбаев З.И. Прогностическая значимость показателей электронейромиографии и вызванных потенциалов при стенозе позвоночного канала // *Медицинские новости*. 2019. № 6 (297). С. 69–71. EDN: GPZGZQ
5. Миронов С.П., Ветрилэ С.Т., Крупаткин А.И., Швецов В.В. Особенности регионарной вегетативной регуляции и корешковой микроциркуляции у больных остеохондрозом позвоночника до и после поясничной дискэктомии // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2008. № 2. С. 15–19. EDN: JTGFBYB
6. Srinivasan G., Sujatha N. Fractal Dimension Characterization of in-vivo Laser Doppler Flowmetry signals // *Physics Procedia*. 2011. Vol. 19. P. 49–54. doi: 10.1016/j.phpro.2011.06.124
7. Gallagher M.J., Hogg F.R.A., Zoumprouli A., et al. Spinal Cord Blood Flow in Patients with Acute Spinal Cord Injuries // *J Neurotrauma*. 2019. Vol. 36, № 6. P. 919–929. doi: 10.1089/neu.2018.5961
8. Reynès C., Vinet A., Maltinti O., Knapp Y. Minimizing the duration of laser Doppler flowmetry recordings while maintaining wavelet analysis quality: A methodological study // *Microvasc Res*. 2020. Vol. 131. P. 104034. doi: 10.1016/j.mvr.2020.104034
9. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем. Колебания, информация, нелинейность. Руководство для врачей. Москва: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2013. 496 с.
10. Крупаткин А.И. Функциональная оценка периваскулярной иннервации кожи конечностей с помощью лазерной доплеровской флоуметрии // *Физиология человека*. 2004. Т. 30, № 1. С. 99–104. EDN: OXNWFR

REFERENCES

1. Alsaleh K, Alduhaish A. A limited unilateral transpedicular approach for anterior decompression of the thoracolumbar spinal cord in elderly and high-risk patients. *J Craniovertebr Junction Spine*. 2019;10(2):88–93. doi: 10.4103/jcvjs.JCVJS_20_19
2. Krupatkin AI, Sidorov VV. Laser Doppler flowmetry. In: Beresten NF, Sandrikova VA, Fedorova SI, editors. *Functional diagnostics: National guidelines*. Moscow: GEOTAR-Media; 2019. P. 488–499.
3. Ippolitova EG, Damdinov BB, Koshkareva ZV, Verkhovina TK. Electroneuromyographic parameters in patients with spinal canal stenosis at the cervical level. *Acta Biomedica Scientifica*. 2020;5(5):68–72. doi: 10.29413/ABS.2020-5.5.9
4. Adambaev ZI. Prognostic significance of electroneuromyography and evoked potentials in spinal canal stenosis. *Medical news*. 2019;(6):69–71. EDN: GPZGZQ
5. Mironov SP, Vetrile ST, Krupatkin AI, Shvets VV. Features of regional vegetative regulation and radicular microhemocirculation in patients with osteochondrosis of the spine before and after lumbar discectomy. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2008;(2):15–19. EDN: JTGFBYB
6. Srinivasan G, Sujatha N. Fractal Dimension Characterization of in-vivo Laser Doppler Flowmetry signals. *Physics Procedia*. 2011;19:49–54. doi: 10.1016/j.phpro.2011.06.124
7. Gallagher MJ, Hogg FRA, Zoumprouli A, et al. Spinal Cord Blood Flow in Patients with Acute Spinal Cord Injuries. *J Neurotrauma*. 2019;36(6):919–929. doi: 10.1089/neu.2018.5961
8. Reynès C, Vinet A, Maltinti O, Knapp Y. Minimizing the duration of laser Doppler flowmetry recordings while maintaining wavelet analysis quality: A methodological study. *Microvasc Res*. 2020;131:104034. doi: 10.1016/j.mvr.2020.104034
9. Krupatkin AI, Sidorov VV. *Functional diagnostics of the state of microcirculatory and tissue systems. Fluctuations, information, non-linearity. A guide for doctors*. Moscow: LIBROCOM Book House; 2013. 496 p.
10. Krupatkin AI. Functional assessment of perivascular innervation of the skin of the extremities using laser Doppler flowmetry. *Human Physiology*. 2004;30(1):99–104. EDN: OXNWFR

ОБ АВТОРАХ

Назаренко Антон Герасимович, д-р мед. наук, профессор РАН;
ORCID: 0000-0003-1314-2887;
eLibrary SPIN: 1402-5186;
e-mail: nazarenkoag@cito-priorov.ru

Крупаткин Александр Ильич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-5582-5200;
eLibrary SPIN: 3671-5540;
e-mail: krup.61@mail.ru

Кулешов Александр Алексеевич, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-9526-8274;
eLibrary SPIN: 7052-0220;
e-mail: cito-spine@mail.ru

AUTHORS' INFO

Anton G. Nazarenko, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor of RAS;
ORCID: 0000-0003-1314-2887;
eLibrary SPIN: 1402-5186;
e-mail: nazarenkoag@cito-priorov.ru

Alexander I. Krupatkin, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor;
ORCID: 0000-0001-5582-5200;
eLibrary SPIN: 3671-5540;
e-mail: krup.61@mail.ru

Alexander A. Kuleshov, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-9526-8274;
eLibrary SPIN: 7052-0220;
e-mail: cito-spine@mail.ru

*** Милица Игорь Михайлович;**

адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10;
ORCID: 0009-0005-9832-316X;
eLibrary SPIN: 4015-8113;
e-mail: igor.milica@mail.ru

Ветрилэ Марчел Степанович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0001-6689-5220;
eLibrary SPIN: 9690-5117;
e-mail: vetrilams@cito-priorov.ru

Лисянский Игорь Николаевич, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-2479-4381;
eLibrary SPIN: 9845-1251;
e-mail: lisigornik@list.ru

Макаров Сергей Николаевич, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0003-0406-1997;
eLibrary SPIN: 2767-2429;
e-mail: moscow.makarov@gmail.com

*** Igor M. Militsa;**

address: 10 Priorova str., 127299 Moscow, Russia;
ORCID: 0009-0005-9832-316X;
eLibrary SPIN: 4015-8113;
e-mail: igor.milica@mail.ru

Marchel S. Vetrile, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0001-6689-5220;
eLibrary SPIN: 9690-5117;
e-mail: vetrilams@cito-priorov.ru

Igor N. Lisyansky, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-2479-4381;
eLibrary SPIN: 9845-1251;
e-mail: lisigornik@list.ru

Sergey N. Makarov, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0003-0406-1997;
eLibrary SPIN: 2767-2429;
e-mail: moscow.makarov@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author