

Винокур Татьяна Юрьевна

канд. мед. наук, доцент,

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

Смирнов Сергей Иванович

тренер-преподаватель

БУ ДО «Спортивная школа олимпийского резерва №2»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

Михайлов Дмитрий Винцентович

тренер-преподаватель

МБУ ДО «СШ «Энергия»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

Капитонов Данил Иванович

тренер-преподаватель

МБУ ДО «СШ им. В.К. Львова»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

Кожанов Виктор Иванович

канд. пед. наук, доцент

Чебоксарский филиал

ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства

и государственной службы при Президенте Российской Федерации»

г. Чебоксары, Чувашская Республика

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ АКТИВНОСТИ МЕЖКЛЕТОЧНОЙ
МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ В ТКАНЯХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ
ДОПЛЕРОВСКОЙ ФЛОУМЕТРИЕЙ (ЛДФ)**

Аннотация: в статье представлены результаты полиорганного вейвлет-анализа биохимических процессов кровоснабжения капиллярного русла и регионального кровообращения, миогенной автоматии вазомоторной реакции, направленного на поддержание активности энергобаланса пульсовой

активности. Использованы методы компьютерной перфузионной диагностики по базовой оценочной шкале (модифицированная шкала фактора риска SCORE). Детализированы регулятивные механизмы взаимодействия гуморальной саморегуляции сосудистого тонуса и реактивности тканевого кровотока (эффект Остроумова/Бейлиса). Полученные результаты расширяют понимание механизмов вазомоторной реакции, транзитарной функции ауторегуляции тонуса мелких сосудов в ответ на динамику колебаний процесса перфузии, а также дисфункцию нарушений баланса «вазодилатации» и «вазоконстрикции» на региональном уровне. Результаты адресованы специалистам в области спортивной кардиологии и фармакологии декомпенсированных нарушений тканевого кровотока в популяции детей и подростков, занимающихся соревновательной нагрузкой с различным коридором пульсовой активности.

Ключевые слова: тканевая перфузия, капилляроскопия, вазомоторная дисфункция, вазодилатация, вазоконстрикции, миогенная регуляция.

Актуальность. Исследования феномена эффекта Остроумова – Бейлиса и критерий оценки устойчивости механизмов модуляции тканевого кровотока, стеночный трансмуральный триггер, являются приоритетным направлением профилактики в рамках мониторинговых программ по диагностике качества здоровья детей и подростков.

В соответствии с рекомендациями Министерства здравоохранения РФ (в ред. от 01.01.2026) по направлению «Медицинское клиническое сопровождение лиц, занимающихся соревновательной нагрузкой», требуется дальнейшая разработка кардиологических методов диагностики по профилактике микроциркуляции кровотока при различных коридорах пульсовой активности.

Цель. Провести скринирующий анализ состояния микроциркуляторного русла, регулятивных гуморальных процессов перфузии, диффузии и активности кровотока (кровоснабжения) в тканевом капиллярном русле, обеспечивающий устойчивый метаболический тканевый обмен.

Задача.

Информативная визуализация регулятивной функции механизмов сигналинга тканевого дыхания и верификация полученных результатов методом ультразвуковой доплерографии с определением функционального класса поддержания регионального кровообращения капиллярного тканевого кровотока, обеспечивающие спонтанную «пульсацию» потока на клеточном уровне.

Материал исследования.

В рамках контролируемого пилотного проекта (Controlled study) были обследованы 33 подростка (17 девочек и 16 мальчиков) в возрасте $18,7 \pm 0,1$ года, занимающихся физической соревновательной нагрузкой (ФН).

Тестирование проводилось на платформе виртуального cycling-тренажёра Zwift с использованием нагрузочного функционального теста Ramp-тест.

Оценку вариабельности транскапиллярного кровотока энергетической активности обмена в капиллярном русле, процессов перфузии оценивали методом резонансной радиометрии и лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), чувствительной к изменению колебаний сосудистой проницаемости и просвета стенок микрососудов.

Верификация гликолитических процессов тканевой миогенной регуляции проводилась по следующим критериям:

- индекса флаксмоций (ИФМ);
- пикового значения потребления кислорода (МПК или peakVO_2);
- показателя респираторного индекса и вентиляции лёгких и утилизации избыточного количества углекислого газа ($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$);
- интерпретацию ацидоза (ПАНО) определяли по трендовому значению баланса транспортной функции доставки кислорода и утилизации углекислого газа (O_2/CO_2) по методу V-slope;
- измерение показателя сатурации (SpO_2) гемодинамики артериальной крови проводилось методом трансмиссионной пульсоксиметрии.

По значению биохимических процессов и характера флаксмоций (flux), уровня вазомоторной реакции в тканях в коридоре различной пульсовой активности были сформированы группы:

- пульсовая зона 50–60% от «тах» ЧСС уд/мин;
- пульсовая зона 61–70% от «тах» ЧСС уд/мин;
- пульсовая зона 71–80% от «тах» ЧСС уд/мин.

Интегральную оценку баланса механизма модуляции (ИФМ) тканевого кровотока в капиллярном русле проводили по показателю индивидуальной устойчивости внутри клетки методом спектрального анализа ЛДФ-граммы по формуле:

$$\text{Индекс флаксмоций (ИФМ)} = ALF / (ALF + ACF) \text{ усл/ед.}$$

Локальное значение спектра колебаний процессов перфузии, диффузии и механизмов миогенной регуляции кровотока в тканях проводилось с учётом тканевого биомаркёра кровотока, обеспечивающего баланс регулятивного тонуса, по оценке устойчивости вазомоторной активности.

Сравнительная точность полученных результатов проводилась методом анализа факторной сопряжённости (*хи-квадрат Пирсона*).

Таблица 1

Интегральная оценка модуляции тканевого кровотока (ИФМ)
с различной пульсовой активностью (в модификации шкалы Risk Score 2-OP)

Показатель активности гемодинамики		Результат функциональной нагрузочной пробы (Ramp/тест)		
		Пульсовая зона 50–60% от «тах» ЧСС уд/мин	Пульсовая зона 61–70% от «тах» ЧСС уд/мин	Пульсовая зона 71–80 % от «тах» ЧСС уд/мин
* Индекс флаксмоций (ИФМ) усл/ед		2,44±0,02	2,41±0,01	2,31±0,02
Респираторный индекс (PaO ₂ /FiO ₂) мм/рт/ст		394,5±0,3	386,2±0,1	398,1±0,6
Дыхательный коэффициент (pik/mah V)		69,6±0,5	70,8±0,5	73,6±0,5
Кислородный пульс (O ₂ sis)	юноши	16,21±0,01	17,81±0,01	16,31±0,01
	девушки	16,71±0,01	17,91±0,01	16,01±0,01
Вентиляционный эквивалент по CO ₂	юноши	94,5±0,3	96,2±0,1	97,1±0,6
	девушки	84,5±0,6	87,1±0,3	88,1±0,1
ПАНО (%), от МПК, по методу V-slope		0,88±0,1	0,84±0,1	0,86±0,1
МПК VO ₂ (л/мин/кг)		3,9±0,1	4,1±0,2	3,8±0,4
La max (ммоль/л)		≥ 1,8±0,4	≥ 1,9±0,6	≥ 1,7±0,2
Sat O ₂ (%)		95,9±0,3	97,1±0,4	96,2±0,1

*Примечание. *Индекс флаксмоций (усл/ед) – показатель механизмов модуляции вазомоторной реакции в капиллярном русле с различной пульсовой активностью.*

Резюме. Отсутствие детализации регулятивного критерия оценки пульсовой волны является триггерным механизмом снижения активности капиллярного кровотока. В данном исследовании рассматривается концепция локусного референсного значения колебаний флаксмоций (flux), что коррелирует с миогенной, гуморальной и метаболической регуляцией.

Выявлена зависимость индекса флаксмоций от пульсовой зоны: наибольшая устойчивость миогенной регуляции наблюдается в зоне 50–60% ЧСС_{макс} (ИФМ 2,44), тогда как при увеличении нагрузки до 71–80% ЧСС_{макс} индекс снижается до 2,31, что свидетельствует о напряжении компенсаторных механизмов. Респираторный индекс остаётся стабильным во всех группах (386–398 мм рт. ст.), однако сатурация (SpO₂) демонстрирует незначительные колебания, указывая на эффективность системы оксигенации даже при высоких нагрузках.

Стандартизация колебаний миогенной регуляции является ключевой для понимания гистологических основ вазоконстрикции и вазодилатации. Прогностическая модель, основанная на дисбалансе тонуса сосудов, позволяет выявлять ранние признаки декомпенсации кровотока и нарушения проницаемости тканевого обмена.

Выводы.

Эффективность метода: комбинированное использование лазерной доплеровской флоуметрии и вейвлет-анализа позволяет достоверно визуализировать активность межклеточной микроциркуляции и оценивать миогенную регуляцию сосудистого тонуса у спортсменов.

Динамика ИФМ: индекс флаксмоций (ИФМ) является чувствительным маркёром состояния микроциркуляции. Снижение ИФМ с 2,44 до 2,31 усл. ед. при переходе от умеренной (50–60% ЧСС_{макс}) к субмаксимальной нагрузке (71–80%

ЧССмакс) отражает истощение резервов миогенной ауторегуляции и переключение на гуморальные механизмы поддержания кровотока.

Роль эффекта Остроумова – Бейлиса: подтверждена значимость миогенного компонента в поддержании постоянного тканевого кровотока при изменении перфузионного давления. Нарушение синхронизации между перфузией и диффузией в зонах высокой пульсовой активности может служить предиктором вазомоторной дисфункции.

Клиническое применение: разработанный алгоритм оценки межклеточной миогенной активности повышает полиорганный неинвазивный скрининг декомпенсированной скрытой дисфункции тканевой микроциркуляции.

Прогностические закономерности служат диагностическим маркёром для детализации объёма тренировочных нагрузок, связанного с феноменом тканевой гипоксии на микроциркуляторном уровне.

Перспективы: дальнейшие исследования должны быть направлены на корреляцию показателей индекса флаксмоций (ИФМ) как биохимического маркёра трансмурального механизма для комплексной профилактической модели при хронических заболеваниях сердечно-сосудистой системы в популяции детей и подростков.

Список литературы

1. Метаболическое здоровье населения // Российский кардиологический журнал: научно-практический рецензируемый журнал. – 2024. – № 45 (144). – С. 44–48.
2. Кардиологический вестник. Научно-практический журнал. – 2022. – Т. 17, №1. – С. 58–60.
3. Российский кардиологический журнал. Научно-практический рецензируемый журнал. – 2022. – №4 (144). – С. 44–48.
4. Кардиологический вестник. Научно-практический журнал. – 2024. – Т. 7, №1. – С. 18–20.