

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНФРАЗВУКА НА СТРОЕНИЕ ЛИМФАТИЧЕСКИХ СОСУДОВ

Красноруцкая И.С.<sup>1</sup>, Петренко Е.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта», Санкт-Петербург, e-mail:belka783@mail.ru

Организм подвергается воздействию многочисленных факторов внешней среды, в том числе инфразвука как составляющей части шума, издаваемого техникой. Изучалось строение афферентных лимфатических сосудов подколенных и брыжеечных узлов белых крыс через 2 и 4 недели после воздействия инфразвука. На ранних сроках исследования наблюдаются явления отека, проявляющиеся в значительном расширении просвета лимфатических сосудов, выраженном в большей степени в брыжеечных лимфатических сосудах, имеющих более тонкую стенку. В расширенных лимфангионах миоциты в мышечных манжетках меняют свою ориентацию, что заметно нарушает сократительную активность лимфангионов. Наблюдаются дистрофические изменения миоцитов, однако заметного снижения их численности не выявлено. На более поздних сроках исследования во всех лимфатических сосудах нарастают явления отека и лимфостаза, протекающие на фоне выраженной деформации лимфангионов. Лимфатические сосуды резко расширены, расширенные участки чередуются с резко суженными участками, имеющими извилистую, спиралевидную форму. Наблюдается деформация клапанов, которая приводит к обратному лимфотоку. Снижается содержание миоцитов в мышечных манжетках лимфангиона, миоциты деформированы, имеют выраженные дегенеративные изменения. Значительно нарастает фиброз стенки лимфатических сосудов, что проявляется в выраженном уплотнении и выпрямлении коллагеновых волокон, утолщении их пучков. Пучки коллагеновых волокон теряют свою складчатость, в лимфангионах идут преимущественно продольно. Эластическая сеть распадается на отдельные, неупорядоченно расположенные волокна. Выявленные изменения приводят к преобладанию пассивного лимфотока, а в резко деформированных участках лимфатических сосудов – к обратному лимфотоку, что сопровождается нарастающим отеком и лимфостазом.

Ключевые слова: лимфатические сосуды, деформация лимфангионов, миоциты, коллагеновые волокна.

## THE EFFECT OF INFRASOUND ON THE STRUCTURE OF LYMPHATIC VESSELS

Krasnorutckaia I.S.<sup>1</sup>, Petrenko E.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FGBOU VO «Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health, St. Petersburg», e-mail:belka783@mail.ru

The body is exposed to numerous environmental factors, including infrasound, as part of the noise emitted by technology. The structure of the afferent lymphatic vessels of the popliteal and mesenteric nodes of white rats was studied 2 and 4 weeks after exposure to infrasound. In the early stages of the study, the phenomena of edema are observed, manifested in a significant expansion of the lumen of the lymphatic vessels, expressed to a greater extent in the mesenteric lymphatic vessels with a thinner wall. In dilated lymphangions, myocytes in muscle cuffs change their orientation, which noticeably disrupts the contractile activity of lymphangions. Dystrophic changes in myocytes are observed, however, a noticeable decrease in their number was not revealed. At later stages of the study, the phenomena of edema and lymphostasis increase in all lymphatic vessels, occurring against the background of pronounced deformation of the lymphangions. The lymphatic vessels are sharply dilated, the dilated areas alternate with sharply narrowed areas that have a tortuous, spiral shape. Deformation of the valves is observed, which leads to reverse lymph flow. The content of myocytes in the muscle cuffs of the lymphangion decreases, myocytes are deformed, with pronounced degenerative changes. Fibrosis of the lymphatic vessel wall significantly increases, which manifests itself in a pronounced compaction and straightening of collagen fibers, thickening of their bundles. Bundles of collagen fibers lose their folding, in the lymphangions they run mainly longitudinally. The elastic network splits into separate, randomly arranged fibers. The revealed changes lead to the predominance of passive lymph flow, and in sharply deformed areas of the lymphatic vessels – to reverse lymph flow, which is accompanied by increasing edema and lymphostasis.

Keywords: lymphatic vessels, deformation of lymphangions, myocytes, collagen fibers.

На организм человека, в том числе на организацию лимфотока в лимфатическом русле, влияют многочисленные факторы внешней среды, в том числе инфразвук. Источниками

инфразвук являются шум транспорта, особенно грузового и железнодорожного транспорта, а также громкая ритмичная музыка с использованием ударных инструментов. Известно, что инфразвук оказывает неблагоприятное воздействие на нервную и сердечно-сосудистую систему, изменяя строение сосудистой стенки [1]. Лимфатическая система является частью сердечно-сосудистой системы и также подвержена воздействию неблагоприятных факторов среды, а стенки и клапаны лимфатических сосудов участвуют в обеспечении активного лимфотока и ограничивают обратный ток лимфы. Лимфатические сосуды тесно связаны с лимфатическими узлами, и нарушения лимфотока приводят к нарушениям функциональной активности лимфоузлов [2].

В литературе имеются сведения об изменении строения сосудистой стенки лимфатических узлов под воздействием инфразвука [1], но исследование проводилось на крупных лимфатических структурах лимфатического русла лабораторных животных (грудной проток и поясничные стволы). В то же время состояние сосудистой стенки и функциональная полноценность афферентных лимфатических сосудов лимфоузлов различной локализации оказывают очень большое влияние на их структурно-функциональную активность [2]. Так, выявлена тесная взаимосвязь между строением лимфатических узлов и лимфо- и иммунопозитивной функцией лимфоузлов в процессе адаптации к физическим нагрузкам [3, 4]. Повреждения капсулы и системы синусов лимфатических узлов после интенсивных физических нагрузок сходны с изменениями, выявленными в строме узлов после воздействия инфразвука [5, 6, 7]. Строение афферентных лимфатических сосудов лимфатических узлов различной локализации под воздействием инфразвука изучено недостаточно. Таким образом, строение стенки афферентных лимфатических сосудов соматических и висцеральных лимфатических узлов после воздействия инфразвука представляет большой научно-практический интерес.

Соматические и висцеральные лимфатические сосуды имеют ряд отличий. Для соматических сосудов характерна более толстая стенка с хорошо развитой мышечной манжеткой, состоящей из нескольких слоев миоцитов. Висцеральные лимфатические сосуды имеют менее развитый мышечный слой, мышечные пучки идут косопоперечно или косопродольно, а содержание миоцитов в сосудистой стенке меньше. Клапаны на протяжении висцеральных лимфатических сосудов обычно размещены реже, что приводит к удлинению лимфангионов [8]. Толщина мышечного слоя лимфангионов, количество и распределение миоцитов в них также зависят от видовых особенностей. Так, у мелких грызунов, которые чаще всего используются для проведения опытов, в соматических лимфатических сосудах мышечная манжетка лимфангионов обычно имеет 3 слоя миоцитов, состоящих из пучков с преимущественно поперечной или спиральной ориентацией. Висцеральные сосуды заметно

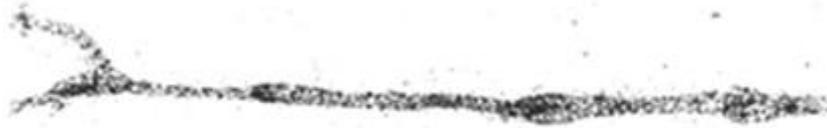
беднее миоцитами, а в брыжеечных лимфатических сосудах белых крыс мышечная манжетка наименее развита [8].

Целью работы явилось изучение воздействия инфразвука на строение афферентных лимфатических сосудов подколенных и брыжеечных лимфатических узлов белых крыс.

**Материал и методы исследования.** Изучалось строение лимфатических сосудов соматических и висцеральных лимфатических узлов беспородных белых крыс-самцов в возрасте 3 месяцев. Подопытная группа составила 30 животных, которых на протяжении четырех недель ежедневно подвергали воздействию инфразвука. Животных помещали в звукоизолированную камеру на 3 ч в день; источником инфразвука являлся генератор инфразвука с частотой 16 Гц и интенсивностью 100 дБ. Контрольную группу составляли 10 крыс-самцов того же возраста, которых на такое же время помещали в аналогичную камеру, но не подвергали воздействию инфразвука. Исследование выполнено на базе Санкт-Петербургской государственной медицинской академии им. И.И. Мечникова.

Изучалось строение афферентных лимфатических сосудов брыжеечных и подколенных лимфатических узлов через 2 и 4 недели после воздействия инфразвука. Лимфатические сосуды, связанные с этими группами лимфоузлов, хорошо доступны для изготовления тотальных препаратов, необходимых для оценки формы лимфангионов и положения их клапанов. Тотальные препараты лимфатических сосудов окрашивали галлоцианин-хромовыми квасцами по Эйнарсону, а гистологические срезы – гематоксилин-эозином, пикрофуксином по Ван Гизону и азаном по Гейденгайну. Проводили морфометрическое исследование и подсчет миоцитов в мышечных манжетках лимфангионов. Сравнивали реакции, протекающие под воздействием инфразвука в подколенных (соматических) и брыжеечных (висцеральных) лимфатических сосудах.

**Результаты исследования и их обсуждение.** У контрольных животных на тотальных препаратах лимфатические сосуды имеют четкообразную форму (рис. 1). В афферентных лимфатических сосудах подколенных лимфоузлов лимфангионы обычно имеют эллипсовидную форму, створки клапанов расположены друг против друга и полностью перекрывают просвет сосуда при сокращении (рис. 2). Мышечная манжетка лимфангионов состоит из двух хорошо выраженных слоев, иногда встречаются одиночные миоциты в адвентиции. Наружный слой миоцитов хорошо развит, образован поперечными или косопоперечными мышечными пучками, которые четко видны на всем протяжении.



*Рис. 1. Брыжеечный лимфатический сосуд контрольной крысы.*

*Тотальный препарат, галлоцианин, ув. x 50*



*Рис. 2. Лимфангион подколенного лимфатического сосуда контрольной крысы.*

*Тотальный препарат, галлоцианин, ув. x 200*

Внутренний слой выражен слабее, здесь мышечные пучки короткие, разреженные, имеют более продольную ориентацию. В афферентных лимфатических сосудах брыжеечных лимфоузлов лимфангионы имеют разную длину, но преобладают длинные лимфангионы; ширина их просвета также варьирует, что зависит от функционального состояния лимфангионов. Мышечная манжетка развита слабее, а стенка лимфангионов тоньше. В мышечной манжетке развит мышечный слой с косопоперечным положением мышечных пучков, сами пучки тоньше, формирующие их миоциты лежат более разрозненно. Внутренний слой также определяется, но здесь миоциты имеют более пологое положение и лежат разрозненно, группируясь в более короткие пучки.

Толщину стенки лимфатических сосудов обеспечивают не только миоциты, концентрирующиеся в основном в центральных отделах лимфангионов, но и соединительнотканые структуры. Коллагеновые волокна стенки сосуда хорошо выражены, группируются в пучки, расположенные преимущественно в косом направлении – косопродольном и косопоперечном. Коллагеновые волокна не очень плотно прилегают друг к другу, идут, извиваясь, а их пучки образуют выраженные складки. Косое положение и извилистый ход коллагеновых волокон, а также складчатая форма их пучков позволяют лимфангионам легко растягиваться в поперечном и продольном направлении в зависимости от функционального состояния сосуда. Эластические волокна также хорошо представлены в стенке лимфатического сосуда, здесь они расположены в косом направлении и под углом друг к другу, образуя сетевидную структуру. При растяжении лимфангиона размер ячеек его

эластической сети увеличивается, а при сокращении сеть становится мелкопетливой. Косое положение волокон не препятствует изменению объема лимфангиона.

Через 2 недели после воздействия инфразвука наблюдается расширение просвета подколенных и брыжеечных лимфатических сосудов в 1,5–2 раза, причем в брыжеечных сосудах расширенных лимфангионов встречается больше, что, вероятно, объясняется их более тонкой стенкой [8]. Лимфангионы начинают терять свою эллипсоидную форму в результате расширения их клапанных частей. Часть лимфангионов, особенно в брыжеечных узлах, становится равномерно расширенной, приобретая бочкообразную форму. В расширенных лимфангионах меняется строение сосудистой стенки. В мышечной манжетке уменьшается количество мышечных пучков с поперечной ориентацией, возрастает количество продольно ориентированных клеток. При этом в центральных отделах лимфангионов брыжеечных сосудов миоциты расположены разрозненно, почти не группируясь в мышечные пучки; в подколенных сосудах пучки миоцитов в мышечных манжетках сохранены, но лежат разрозненно и приобретают более пологое направление. Однако количество миоцитов во всех сосудах достоверно не отличается от данных контроля.

Структура миоцитов также меняется: они выглядят набухшими, утолщенными, особенно в центральной своей части, их цитоплазма просветлена. Ядра миоцитов укорачиваются, но заметно утолщены, приобретая овальную или округлую форму, тогда как в норме ядра миоцитов вытянутые, веретеновидные или палочковидные. При этом измененные миоциты определяются только в расширенных, растянутых участках лимфатического сосуда. Наряду с деформированными лимфангионами у подопытных животных встречаются и неизменные участки лимфатического русла; в таких лимфангионах форма миоцитов не меняется.

Коллагеновые волокна стенки лимфатических сосудов утолщаются и несколько меняют свое направление: количество косо расположенных коллагеновых пучков уменьшается, но возрастает число пучков с продольной или поперечной ориентацией. В некоторых лимфангионах встречаются стяжки, появляющиеся обычно на одной стороне на фоне утолщенного участка сосуда с увеличенным просветом (рис. 3).



*Рис. 3. Брыжеечный лимфатический сосуд подопытной крысы, 2 недели после воздействия инфразвука. Тотальный препарат, галлоцианин, ув. х 100*

Меняется и эластический каркас стенки лимфатических сосудов: сеть эластических волокон становится растянутой, крупноячеистой, а в некоторых участках она вовсе теряет свою конфигурацию, распадаясь на отдельные неупорядченно расположенные волокна. В неизмененных лимфангионах, сохранивших строение своей стенки, ширина просвета может быть незначительно увеличенной или не отличаться от контрольных показателей. Структура соединительнотканного каркаса стенки в таких лимфангионах не меняется. Выявленные изменения встречаются в лимфатических сосудах и подколенных, и брыжеечных лимфоузлов.

Таким образом, через 2 недели после воздействия инфразвука в афферентных лимфатических сосудах подколенных и брыжеечных лимфатических узлов определяются однотипные изменения, связанные, прежде всего, с явлениями отека и лимфостаза, которые проявляются в заметном расширении просвета большей части лимфангионов и нарушениях строения активной части лимфангионов – мышечных манжеток.

Через 4 недели после воздействия инфразвука сохраняется расширение подколенных и брыжеечных лимфатических сосудов. При этом расширенные участки лимфатических сосудов имеют цилиндрическую форму, их диаметр одинаков на всем протяжении лимфангиона – и в центральной, и в клапанной его части. В результате расположенные друг за другом расширенные лимфангионы выглядят как трубка, имеющая одинаковый диаметр на всем своем протяжении (рис. 4).



*Рис. 4. Подколенный лимфатический сосуд подопытной крысы, 4 недели после воздействия инфразвука. Тотальный препарат, галлоцианин, ув. x 100*



*Рис. 5. Брыжеечный лимфатический сосуд подопытной крысы, 4 недели после воздействия инфразвука. Тотальный препарат, галлоцианин, ув. x 100*

Группы расширенных, окончательно утративших эллипсоидную форму лимфангионов чередуются с резко суженными участками лимфатического сосуда, имеющими

выраженную деформацию стенки (рис. 5). Такие суженные участки лимфатического сосуда часто идут с изгибами или имеют извилистую, спиралевидную форму. В суженных, деформированных участках лимфатического сосуда происходит смещение створок клапанов, разделяющих лимфангионы, в результате чего створки клапанов не могут соприкоснуться при смыкании и не способны полностью перекрыть просвет сосуда, что сопровождается серьезным нарушением лимфотока. Такие изменения наблюдаются и в соматических, и в висцеральных лимфатических сосудах, но в брыжеечных лимфатических сосудах деформация лимфангионов более выражена. Здесь брыжеечные лимфатические узлы у крыс образуют цепочку, идущую вдоль кровеносных сосудов, а лимфатические сосуды соединяют узлы, располагаясь между ними, и создается впечатление, что деформированы все участки лимфатических сосудов в той или иной степени. Большая часть лимфангионов расширена, причем в разной степени – наряду с цилиндрическими по форме лимфангионами встречаются и бочкообразные; некоторые лимфангионы сохраняют эллипсоидную форму, расширяясь в центральной части.

В расширенных деформированных лимфангионах наблюдается заметное снижение содержания миоцитов – в среднем на 25–30%, хотя и в брыжеечных, и в подколенных сосудах количество миоцитов в лимфангионах сильно варьирует. Поперечные пучки миоцитов в таких лимфангионах практически не встречаются. В лимфангионах подколенных лимфатических сосудов миоциты идут в продольном или косопродольном направлении, пучки их значительно разрежены, заметно укорачиваются и могут располагаться в один ряд. В брыжеечных лимфатических сосудах миоциты в мышечной манжетке деформированных лимфангионов образуют небольшие группы клеток, ориентированных в разных направлениях, в основном – продольно или косопродольно. В брыжеечных сосудах миоциты лежат разрозненно, мышечных пучков практически не образуют, ориентированы в разных направлениях. В подколенных лимфатических сосудах в деформированных лимфангионах в этот срок исследования всегда можно выделить один, а иногда даже два слоя миоцитов, состоящих из мышечных пучков, ориентированных обычно в косопродольном направлении (хотя мышечные пучки тонкие и короткие). Миоциты в лимфангионах набухшие, как и в предыдущий срок исследования; имеют вытянутую овальную форму вместо веретеновидной, с просветленной цитоплазмой. Ядра набухших, деформированных миоцитов имеют округлую форму. В центральной части растянутых, деформированных лимфангионов наблюдается инфильтрация сосудистой стенки малыми лимфоцитами. Лимфоидная инфильтрация стенок лимфангионов выявляется и в подколенных, и в брыжеечных лимфатических сосудах.

В стенке лимфатических сосудов обеих локализаций заметны утолщение и уплотнение пучков коллагеновых волокон, которые разделяют миоциты в мышечной манжетке на

отдельные группы. Коллагеновые волокна стенки лимфатического сосуда теряют свою извилистость и заметно утолщаются. Пучки коллагеновых волокон также становятся заметно толще, чем в контроле. В подколенных лимфатических сосудах утолщение самих волокон и их пучков выражено сильнее, здесь утолщенные коллагеновые пучки иногда приобретают лентовидную форму. Прямые и плотные коллагеновые пучки идут в продольном и реже – в поперечном направлении, косые пучки коллагеновых волокон совсем исчезают. Складчатость коллагеновых пучков, которая всегда выявляется в контроле и обеспечивает способность лимфангиона к растяжению, в деформированных лимфангионах в этот срок полностью исчезает. Сеть эластических волокон в стенке лимфатических сосудов по-прежнему растянута и резко деформируется, в результате чего теряет свою конфигурацию и распадается на отдельно лежащие волокна.

Таким образом, через 4 недели после воздействия инфразвука в афферентных лимфатических сосудах подколенных и брыжеечных лимфатических узлов определяется прогрессирующий отек, который сопровождается заметной деформацией лимфангионов, приводящей к смещению створок клапанов. Выражены фиброз сосудистой стенки и потеря ее эластичности. Резко выражена деформация мышечных манжеток лимфангионов, протекающая на фоне существенного уменьшения численности миоцитов и деструктивных изменений в них.

**Заключение.** Таким образом, шумы окружающей среды, частью которых является инфразвук, оказывают неблагоприятное влияние на организацию лимфотока в соматических и висцеральных лимфатических сосудах. На ранних сроках исследования выявляется отек лимфатических сосудов, не сопровождающийся заметной деформацией сосудистой стенки. На более поздних сроках исследования явления нарастающего отека сопровождаются значительной деформацией сосудистой стенки и ее нарастающим фиброзом, приводящим к выраженной деформации лимфангионов. Выраженная деформация сосудистой стенки проявляется в чередовании заметно расширенных, цилиндрических по форме лимфангионов с резко суженными сегментами лимфатического сосуда. Локальный спазм некоторых лимфангионов может быть результатом повышенного тонуса симпатической системы, вызванного воздействием инфразвука [1].

Деформация лимфангионов сопровождается смещением створок клапанов лимфатического сосуда, которые теряют способность к смыканию при сокращении лимфангиона. Деформированные клапаны не способны перекрыть просвет сосуда, что ведет к заметной функциональной недостаточности лимфатического сосуда – усилению обратного лимфотока, который сопровождается лимфостазом и отеком. В результате в деформированных участках лимфатических сосудов имеет место только пассивный лимфоток.

Деструктивные изменения в большей степени выражены в брыжеечных лимфатических узлах, что обусловлено более тонкой стенкой и меньшим содержанием миоцитов в ней.

В резко расширенных лимфангионах на поздних сроках исследования заметно снижено содержание миоцитов в мышечных манжетках лимфангионов; меняется направление мышечных пучков. На протяжении всего эксперимента наблюдаются деструктивные изменения миоцитов. Выявленные изменения приводят к заметным нарушениям сократительной активности лимфангионов, которые сопровождаются лимфостазом. На поздних сроках исследования отмечается лимфоидная инфильтрация мышечных манжеток лимфангионов, что объясняется повышением проницаемости сосудистой стенки, возникающей в результате деструктивных процессов, протекающих в ней [9].

Выраженная неравномерность просвета лимфатических сосудов, деформация клапанов, деструктивные изменения в сосудистой стенке и в мышечных манжетках лимфангионов, а также уменьшение содержания миоцитов, выявленные через 4 недели после воздействия инфразвука, могут привести к лимфостазу и полному выключению из лимфотока поврежденного сегмента лимфатического русла.

### Список литературы

1. Petrenko V.M. About mechanics of influence of infrasound on living organism. *Journal of Biomedical Systems and Emerging Technologies*. 2018. V. 5. No. 2. 120 p.
2. Петренко В.М. Лимфатический узел как лимфангион. Saarbrücken: LAP, 2016. 84 с.
3. Ткачук М.Г., Страдина М.С. Органы иммунной системы в условиях интенсивных физических нагрузок и в периоде восстановления // *Физическая реабилитация в спорте, медицине и адаптивной физической культуре: мат-лы V Всероссийской научно-практической конференции*. Министерство спорта РФ, ФГБОУ ВО «Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург». СПб.: НГУ имени П.Ф. Лесгафта, 2019. С. 336-340.
4. Ткачук М.Г., Дюсенова А.А., Петренко Е.В. Репаративные процессы в лимфоидных органах после воздействия физических нагрузок // *Инновации и традиции в науке и образовании: монография*. Петрозаводск : МЦПН «Новая наука», 2021. С. 73-88.
5. Ткачук М.Г., Страдина М.С. Способы коррекции иммунных расстройств в период восстановления после длительных физических нагрузок // *Физическая реабилитация в спорте, медицине и адаптивной физической культуре: мат-лы IV Всероссийской научно-практической конференции*. Министерство спорта РФ, ФГБОУ ВО «Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта, Санкт-

Петербург», медицинский научно-образовательный кластер «Трансляционная медицина». СПб.: НГУ имени П.Ф. Лесгафта, 2018. С. 327-330.

6. Петренко Е.В. Строение лимфатического узла при воздействии физических нагрузок и инфразвука // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6. № 1. С. 35-42.

7. Страдина М.С. Адаптивные изменения органов иммунной системы при физических нагрузках и после их завершения // Научно-практические школы в сфере физической культуры и спорта: мат-лы Межд. научно-практического конгресса, посв. 100-летию ГЦОЛИФК под ред. А.А. Передельского. 2018. С. 276-279.

8. Петренко В.М. Функциональная морфология лимфатических сосудов. СПб.: СПбГМА, Издательство ДЕАН, 2008. 400 с.

9. Petrenko V.M. Structural and functional foundations of immunity: the circulation in living organism. SCIOL Biomed, 2019. V. 3. N 1. P. 155-160.