



DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2020.2.09

УДК 534.7

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ЧЕЛОВЕКА

Н.И. Иванов¹, В.Н. Зинкин², Л.П. Сливина³

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

² Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Минобороны РФ, Российская Федерация, 141103, Московская область, Щелково, ул. Аэродромная, 2–5, e-mail: zinkin-vn@yandex.ru

³ Волгоградский государственный медицинский университет, Российская Федерация, 400131, Волгоград, пл. Павших борцов, 1

Аннотация. Цель работы обосновать механизмы действия низкочастотных акустических колебаний на человека, обусловленных механическим взаимодействием акустических колебаний с анатомическими структурами тела. Одной из современных особенностей производственного шума является доминирование в шумовом спектре низкочастотного шума и инфразвука высокой интенсивности. Для характеристики этих диапазонов в научной литературе используется термин «низкочастотные акустические колебания», что обусловлено близкими физическими свойствами и биологическим действием на организм человека и животных. Доказано, что инфразвук оказывает неблагоприятное действие на многие органы (дыхание, слух, зрение и др.) и системы человека (центральная и вегетативная нервная и др.) и приводит к развитию заболеваний, в том числе профессиональных (нейросенсорная тугоухость, вестибулопатия, вегетативные нарушения). На основании этого инфразвук включен в перечень вредных производственных факторов. Ряд биологических эффектов формируется за счет прямого механического взаимодействия акустических колебаний с анатомическими структурами тела человека. Длина акустической волны и ее интенсивность являются определяющими параметрами при формировании ответной реакции в организме человека. Взаимодействие низкочастотных акустических колебаний с анатомическими структурами тела необходимо рассматривать как взаимодействие двух механических систем, что приводит к развитию различных физических эффектов в тканях и органах (дифракция, резонанс, упругие волны, кавитация и др.). Последние лежат в основе прямого действия акустических колебаний и приводят к анатомическим повреждениям тканей, конформационным нарушениям клеточных структур и макромолекул, активации рецепторов (механо-, проприо-, вестибулорецепторов и др.). Биомеханическое действие низкочастотных акустических колебаний должно учитываться при нормировании низких частот звукового диапазона и определении способов и средств защиты от низкочастотных акустических колебаний не только органа слуха и головы, но и внутренних органов.

Ключевые слова: низкочастотные акустические колебания, механизмы действия, длина волны, уровень звукового давления, звукопроводимость, резонанс, защита.

© Иванов Н.И., Зинкин В.Н., Сливина Л.П., 2020

Иванов Николай Игоревич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой экологии и безопасности жизнедеятельности, Санкт-Петербург

Зинкин Валерий Николаевич, д.м.н., профессор, с.н.с. научно-исследовательского испытательного центра авиационно-космической медицины и военной эргономики, Санкт-Петербург

Сливина Людмила Петровна, д.м.н., профессор, заведующая кафедрой гигиены, Волгоград

ВВЕДЕНИЕ

Шум занимает ведущее место среди неблагоприятных факторов производственной среды, а его действие приводит к снижению работоспособности, увеличению общей и профессиональной заболеваемости. Несмотря на большое количество клинических и экспериментальных данных о действии шума на организм человека и животных, широкая распространенность шума в промышленности и на транспорте, увеличение экономических потерь за счет роста заболеваемости лиц «шумовых» профессий, недостаточная эффективность средств защиты от шума и мероприятий по профилактике шумовой патологии, расширение негативного влияния шума на окружающую среду и население обуславливают необходимость продолжения исследований по профилактике шумовой патологии [8, 10, 19, 21].

Происходящие в последние годы изменения в хозяйственном комплексе страны, нестабильность производства и финансирования, отсутствие экономической заинтересованности у работодателей в сокращении профессиональных заболеваний и производственного травматизма способствовали сохранению неудовлетворительного состояния условий труда в РФ. На протяжении двух последних десятилетий наблюдается рост доли работников, занятых на производствах с вредными и опасными условиями труда, не отвечающих санитарно-гигиеническим нормам. Их численность составила 32,8% от общего числа работающих в промышленности. Воздействию производственного шума с уровнем, превышающим предельно допустимый, в Российской Федерации подвергаются свыше 3,5 млн человек. Неудовлетворительные условия труда, воздействие вредных производственных факторов на организм работающих являются основной причиной формирования у них профессиональных заболеваний [28].

Несмотря на проводимые мероприятия по борьбе с шумом, это не приводит к снижению заболеваемости, поэтому уровень экономических потерь от шума продолжает оставаться на высоком уровне. Такая ситуация требует постоянного контроля за профилактикой вредного действия шума и ее совершенствованием [27].

На протяжении эволюции человек подвергался действию различного вида механических колебаний, в том числе акустических, что привело к формированию специфических структур в виде механорецепторов (тактильные и слуховые рецепторы, проприо-, баро- и вестибулорецепторы) для восприятия внешних сигналов из окружающей среды. В зависимости от частоты акустических колебаний выделяют инфра-, ультра- и звуковой диапазоны. В основу данной классификации положено восприятие звука ухом человека, такое разделение носит условный характер. Под инфразвуком принято понимать акустические колебания частотой ниже 16–20 Гц. К звуковому диапазону относят акустические колебания 20–20000 Гц, воспринимаемые человеческим ухом как тональные сигналы. По преимуществу преобладания акустической энергии в той или иной части спектра шум делится на низкочастотный (до 250 Гц), среднечастотный (500–1000 Гц) и высокочастотный (2000–8000 Гц). К ультразвуку относят акустические колебания свыше 16000 Гц, которые ухо человек не воспринимает.

В последние десятилетия в научной литературе, посвященной неблагоприятному биологическому действию шума, используется термин «низкочастотные акустические колебания». Как правило, в этот диапазон включают акустические колебания частотой ниже 250 Гц, то есть в него входят инфразвук и низкочастотный шум. Выделение данного диапазона некоторые авторы обосновывают наличием близкого физического подобия ряда параметров (большая длина волны, низкое затухание и др.) и схожих биологических эффектов (аурикулярные и экстрааурикулярные) при действии на организм человека и животных [3, 18, 23].

История изучения биологического действия инфразвука исчисляется несколькими десятилетиями. Наибольший вклад в изучение действия шума и инфразвук внесли отечественные ученые (Е.Ц. Андреева-Галанина, Н.И. Карпова, В.Г. Артамонова, Н.Ф. Измеров, Г.А. Суворов, В.И. Свидовый и др.) [17]. Было показано, что инфразвук оказывает неблагоприятное действие на многие органы и системы человека. На основании полученных данных он был включен в перечень вредных производственных факторов [Приказ Минздравсоцразвития от 16.08.2004 г. № 83], и определен перечень профессиональных заболеваний, обусловленных его действием [Приказ Минздравсоцразвития от 27.04.2004 г. № 417н].

В то же время необходимо отметить, что научных публикаций о механизме действия инфразвука недостаточно, и они носят фрагментарный характер [11, 20, 23, 29].

Цель работы: обосновать механизмы действия низкочастотных акустических колебаний на человека, обусловленных механическим взаимодействием акустических колебаний с анатомическими структурами тела.

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШУМА

Производственный шум, создаваемый при эксплуатации техники и транспортных средств, производственного оборудования, представляет собой акустические колебания в широком диапазоне – от инфразвукового до ультразвукового. В настоящее время удельный вес промышленных предприятий, не отвечающих санитарно-эпидемиологическим требованиям по уровню шума, составляет 31,3 %, а удельный вес рабочих мест 24,63 %. Уровни звука, генерируемые производственным оборудованием, достигают 92–95 дБА и более, а шум от специализированных транспортных средств, применяемых в данных отраслях, достигает свыше 87 дБА (при норме 80 дБА СанПин 2.2.4.3359–16).

Главными причинами превышения уровней шума на рабочих местах являются несовершенство технологических процессов, конструктивные недостатки технологического оборудования, их физический износ и невыполнение плановых ремонтов, недостаточная ответственность работодателей и руководителей производств за состояние условий и охраны труда [22].

Прослеживается четкая тенденция увеличения вклада низкочастотных и инфразвуковых составляющих спектр производственного шума (табл. 1). Результаты акустических измерений показывают, что если уровни воздушного шума составляют около 90–100 дБА, то можно ожидать присутствия инфразвука с уровнем звукового давления 100–107 дБ [17, 18, 20, 23].

К наиболее неблагоприятным акустическим параметрам относят уровень звука, особенно свыше 100 дБА, колебание во времени (непостоянный и импульсный шум), длительное и непрерывное действие в течение рабочей смены, большой стаж работы с шумом, преобладание в спектре высоких частот (2000–6000 Гц) и наличие инфразвука. Показано, что сочетание ряда перечисленных параметров сопровождается усилением неблагоприятных эффектов от шума [4, 12–16].

На основании вышеизложенного к современным особенностям производственного шума можно отнести:

- широкую распространенность шума на промышленных объектах;
- достаточно высокий удельный вес промышленных предприятий, не отвечающих санитарно-эпидемиологическим требованиям по уровню шума;
- сочетанное воздействие неблагоприятных акустических параметров;
- частую встречаемость в спектре шумов доли низкочастотных и инфразвуковых частот высокой интенсивности (уровень звукового давления свыше 100 дБ).

Таблица 1

Источники низкочастотных и инфразвуковых колебаний на промышленных объектах

Наименование	Уровни звукового давления, дБ	Максимум энергетического спектра, Гц
Автотранспорт	93–120	4–31,5
Железнодорожный транспорт	92–127	8–50
Грузовые речные и морские суда	110–130	8–45
Суда на подводных крыльях и воздушной подушке	100–130	6–10
Турбореактивные самолеты	105–135	16–125
Поршневые самолеты	95–110	50–250
Вертолеты	100–120	8–45
Металлургическая промышленность	95–108	8–31,5
Газовая и нефтяная промышленность	92–123	8–63
Авиационная промышленность	90–132	10–150
Горнодобывающая и строительная промышленность	98–123	10–45

АУРАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Шум, являясь общебиологическим раздражителем, воздействует на все органы и системы организма. При воздействии шума развиваются определенные физиологические изменения, которые зависят от конкретных условий: уровня и характера шума, продолжительности его воздействия, индивидуальных свойств человека и других факторов, которые не всегда можно учесть. При определенных условиях действие шума приводит к развитию патологических изменений. Физиологические и патологические эффекты, вызываемые влиянием шума, принято подразделять на две группы: специфические (ауральные) проявления, наступающие в органе слуха, и неспецифические (экстраауральные), возникающие в других органах и системах.

В основу восприятия звука ухом человека положена длина акустической волны (λ). Установлено, что чувствительность уха падает с уменьшением частоты звука. Для сближения результатов объективных измерений и субъективного восприятия используют стандартные значения коррекции уровня звука (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что в области низких частот (< 250 Гц) величина ΔL_A достигает значимых величин (от 8,6 до 42 дБ), тем самым показывая снижение значимости слухового анализатора в формировании ответной реакции организма человека при действии низких частот звукового диапазона. С нашей точки зрения, это явилось основанием для установления достаточно высоких значений предельно допустимых уровней звукового давления для октавных полос со среднегеометрической частотой 31,5 Гц (107 дБ) и 63 Гц (95 дБ) в соответствии с СанПин 2.2.4.3359–16.

Долгое время существовало мнение, что акустические колебания в инфразвуковой части спектра лежат за пределами слухового восприятия человека. Установлено, что инфразвук воспринимается не как чистые тоны, а как сочетание слуховых и тактильных ощущений и сопровождается ощущением давления

Таблица 2

Стандартное значение коррекции ΔL_A [6]

Частота, Гц	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Коррекция, дБ	80	42	26,3	16,1	8,6	3,2	0	-1,2	-1,0	1,1

(пульсации) в среднем ухе, щекотания и массажа барабанной перепонки. По-видимому, восприятие инфразвука происходит за счет гармоник, возникающих в результате деформаций в среднем и внутреннем ухе. Подтверждением могут являться данные теоретических и экспериментальных исследований, показавшие способность низкочастотных акустических колебаний вызывать одномоментное смещение всего столба жидкости улитки. Наблюдаемая многими авторами «ритмическая функциональная пульсация ядер» рецепторных слуховых клеток не только в апикальной части, но и других отделах спирального органа еще больше склоняет к данной точке зрения [7, 20, 23, 26].

Установлены пороги слышимости низкочастотных акустических колебаний: для 100 Гц они составляют около 40 дБ, а для 1 Гц – 140 дБ. Длительное действие низкочастотного шума и инфразвук приводят к увеличению порога слышимости преимущественно в диапазонах низких и средних частот (125–500 Гц) в отличие от средне- и высокочастотного шумов, при действии которых увеличение порогов слышимости начинается с диапазона 4–6 кГц. Это необходимо учитывать в связи с тем, что максимум речевых частот находится в области низких и средних частот (500–2000 Гц), поэтому развитие нарушений слуха у человека в низком и среднем диапазонах могут привести к затруднению понимания речи, что является прогностически неблагоприятным фактором в социальном плане [17, 18].

Ощущение избыточного давления в ухе при действии низкочастотных акустических колебаний появлялось при уровне звукового давления 130 дБ, дальнейшее увеличение приводило к появлению у человека гиперемии барабанной перепонки, а при уровне звукового давления свыше 150 дБ у некоторых испытуемых появлялось чувство боли в ухе. Этот порог следует рассматривать в качестве критерия предела выносливости механической системы при воздействии инфразвука. Механическое повреждение органа слуха у человека, предполагается, будет иметь место при уровнях свыше 160 дБ.

В определенной степени ухо человека защищено от акустического повреждения благодаря рефлексу среднего уха, или рефлексу стремени. В норме этот рефлекс срабатывает при уровне звукового давления 75–90 дБ и имеет собственный латентный период реакции 25–100 мс. Поэтому он быстрее проявит свое действие при более длительных импульсах (низкочастотных), чем коротких (высокочастотных). Сокращение стремени увеличивает импеданс проводящих механизмов, чем достигается аттенуация (снижение) приблизительно на 15–20 дБ на низких и средних частотах.

Исследования лиц, длительно подвергавшихся в условиях производства влиянию низкочастотных акустических колебаний при уровне от 100 до 130 дБ, показали наличие у некоторых из них анатомических изменений барабанной перепонки, а также появление постоянного смещения порога слышимости.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что высокоинтенсивные низкочастотные акустические колебания способны оказывать неблагоприятное прямое действие на орган слуха вплоть до его механического повреждения.

Передача звука к структурам органа слуха осуществляется двумя путями – воздушным и костным. В последнем случае при низкой частоте стимула череп колеблется как единое целое с увеличением частоты колебаний отдельных его частей в противофазе. Такой инерционный тип костного проведения отмечается при действии звуков с относительно большой λ , когда размеры головы (расстояние от уха до уха приблизительно около 30 см) становятся меньше λ , что соответствует частоте менее 1000 Гц. При частоте акустической волны более 1000 Гц череп колеблется не синфазно, а по-разному в отдельных своих частях, поэтому происходит компрессия всей лабиринтной капсулы и перилимфа подвергается давлению, отражающемуся на положении стремени и мембраны окна улитки. Такой тип костного звукопроводения получил название компрессионного, и он в отличие от инерционного типа обусловлен различиями в подвижности окон, что имеет важное значение в диагностической интерпретации результатов аудиометрии при костном звукопроводении. Независимо от типа костного пути передачи это приводит к возникновению бегущей волны на базилярной мембране с последующим развитием слуховой рецепции. Если при невысоких уровнях звука передача стимула за счет костной проводимости мала, то при высоких уровнях она возрастает, усугубляя вредное действие на человека. Нормальные пороги костной проводимости примерно на 35–40 дБ выше воздушных [31].

В соответствии с СанПин 2.2.4.3359–16 при уровнях звука выше предельно допустимого уровня (80 дБА) на рабочих местах необходимо применять в обязательном порядке противошумы для защиты органа слуха, которые перекрывают воздушный канал поступления акустических колебаний. При высоких уровнях шума уже требуется защита всех костных структур головы с помощью противошумного шлема. Пороговой величиной его применения должен быть уровень звука выше 115 дБА (предельно допустимый уровень звука 80 дБ + порог костной проводимости 35 дБ). В то же время наличие в спектре шума низкочастотных акустических колебаний уровня звукового давления свыше 90–100 дБ является основанием противошумных средств защиты головы.

ЭКСТРААУРАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Влияние длины акустической волны λ (эффект дифракции)

Важное место во взаимодействии акустических колебаний и тела человека занимает длина акустической волны (далее – λ). В табл. 3 показано соотношение λ с различными антропометрическими данными человека.

Из табл. 3 следует, что рост человека и туловище человека (грудная клетка и брюшная полость) соизмеримы с λ от 250 Гц и ниже, а голова человека – от 1000 Гц и ниже. Соизмеримость длины падающей λ с препятствием на пути ее распространения позволяет огибать препятствие без изменения параметров волны, то есть происходит дифракция, что создает возможность одновременно воздействовать на голову и тело человека. Такое явление обеспечивает равномерное сжатие и разряжение всей поверхности тела человека с последующим возбуждением поверхностных тканей с последующим формированием волновых процессов во внутренних органах и структурах. Данный феномен обеспечивает механизм прохождения низкочастотных акустических колебаний в тело человека.

Как видно, большая λ и соизмеримость ее с антропометрическими показателями человека обеспечивают сходство между инфразвуком и низкочастотным шумом при действии их на человека, а значит, позволяют прогнозировать близкий характер общих ответных реакций, формирование которых объясняется механическим взаимодействием тела человека и λ [9, 11].

Таблица 3

Соотношение λ с различными антропометрическими данными человека

Исследуемый параметр	Инфразвук (2–20 Гц)	Низкочастотный шум (31,5–250 Гц)
	$\lambda = 170–17$ м	$\lambda = 11–1,4$ м
Отношение длина волны / рост человека (1,8 м)	100–10	6–1
Отношение длина волны / туловище человека (0,8–1,0 м)	212–21	14–2
Отношение длина волны / голова человека (0,3 м)	700–70	40–5

Резонанс

Широкое распространение в работах, посвященных действию инфразвука, получила резонансная теория, в основу которой было положено совпадение резонансных частот тела человека с частотой падающей λ [35]. При этом авторы приводят резонансные частоты для организма в целом и для отдельных органов, полученные при действии общей вибрации. Однако в случае низкочастотных акустических колебаний система оказывается более жесткой, чем при действии общей вибрации, и основной резонанс системы «грудная клетка/брюшная полость» отмечается в частотном диапазоне 40–60 Гц вместо 4–8 Гц в случае действия вибрации (табл. 4).

Из данных табл.4 следует, что резонансные частоты для человека находятся в частотном диапазоне низкочастотных акустических колебаний.

Для подтверждения вышеизложенных данных нами были проведены исследования в лабораторных условиях. Прямые измерения параметров акустических колебаний непрерывных (уровень звукового давления 90–135 дБ частотой ниже 100 Гц) и импульсных с максимумом спектра в области 20–30 Гц проведены путем размещения биообъектов внутри камеры и введения акустического датчика в грудную полость и полость черепа. Исследования показали, что акустические колебания независимо от способа генерации, частоты следования, амплитуды давления и длительности импульса свободно проникают в грудную полость и полость черепа животных и при этом практически не меняется форма и спектральный состав падающей на биообъект волны. Коэффициент трансформации акустического сигнала (параметр снаружи/параметр внутри) колебался в диапазоне у наркотизированных животных 0,78–1,45. Не выявлено различий в прохождении этих акустических колебаний у собаки и кролика.

Таблица 4

Основные резонансные частоты тела человека

Органы и части тела человека	Резонансная частота, Гц
Все тело	3–6; 4–8; 5–12
Внутренние органы	10–100
Грудная клетка/брюшная полость	40–60
Голова	8–27
Грудная клетка	2–12; 5–8; 4–8
Брюшная полость	2–14; 3–4
Глазные яблоки	12–27

Грудную клетку животных и человека следует рассматривать как замкнутую малую оболочку, которая не является препятствием для проникновения низкочастотных акустических колебаний независимо от способа их генерации и не изменяет амплитудных, временных и спектральных характеристик падающей волны. Не выявлено межвидовых отличий прохождения низкочастотных акустических колебаний в грудную клетку, а также резонанса. Основным путем проникновения низкочастотных акустических колебаний в грудную полость является ее наружная поверхность.

Увеличение объема легких приводит к ухудшению проникновения акустических волн в грудную клетку. Необходимо принимать во внимание тот факт, что для волн малой амплитуды ($P_{\pm} < 10$ кПа) существенно влияние дыхания на величину результирующего давления в грудной клетке. Результирующее колебание внутри грудной полости, кроме параметров падающей волны, зависит от амплитуды и фазы давления, обусловленного дыханием. Отсюда следует, что колебания грудной полости достигают максимальной амплитуды при совпадении максимумов амплитуд указанных явлений. В случае разряжения внутри грудной клетки амплитуда падающей волны будет уменьшаться на величину разряжения. Из этого следует, что для волн малой амплитуды импульсных низкочастотных акустических колебаний существенно влияние фазы дыхания на прохождение падающей волны, а для непрерывных – объем легких.

Изучение прохождения низкочастотных акустических колебаний в полость черепа животных показало, что измеренные параметры (амплитудные, временные и спектральные) колебательного процесса в черепе практически полностью совпадают с аналогичными параметрами падающей волны независимо от способа генерации (импульсная или непрерывная). Также не выявлено межвидовых различий в прохождении низкочастотных акустических колебаний в полость черепа и не установлено явлений резонанса. Основным путем проникновения низкочастотных акустических колебаний в череп являются, по-видимому, сосуды и спинномозговой канал. Не выявлено резонанса в полостях и межвидовых отличий прохождения акустических колебаний.

Таким образом, грудную клетку и череп следует рассматривать как замкнутую оболочку, которая не является препятствием для проникновения низкочастотных акустических колебаний.

Резонанс (фр. *resonance*, от лат. *resono* «откликаюсь») – это частотно-избирательный отклик колебательной системы на периодическое внешнее воздействие, который проявляется в резком увеличении амплитуды стационарных колебаний при совпадении частоты внешнего воздействия с определенными значениями, характерными для данной системы. Понятие резонанс имеет свои особенности в зависимости от области применения (электроника, сверхвысокие частоты, оптика и др., в том числе и акустика). В научной литературе периодически делаются попытки использовать термин «резонанс» по отношению к биообъектам при воздействии электромагнитных импульсов и механических колебаний. В таком случае надо более корректно использовать этот термин – например, «биологический резонанс». При этом необходимо учитывать, что биологические ткани и органы в большинстве случаев имеют высокую гетерогенность, содержат большое количество жидкости (кровь, лимфа, вода), обладают достаточной упругостью и пластичностью, происходят циклические колебания формы и объема в пространственно-временном континууме жизнедеятельности и др. Наличие указанных факторов оказывает серьезное негативное влияние на добротность биологических структур и создает трудности для возникновения акустического резонанса.

Распространение упругих волн

Дифракционная способность низкочастотных акустических колебаний приводит к тому, что человек подвергается равномерному избыточному переменному давлению с частотой падающей λ и происходит формирование упругих волн в различных структурах тела. При невысоких уровнях звукового давления (до 100 дБ) только ухо человека воспринимает действие λ за счет деформации (смещения) барабанной перепонки.

При уровне звукового давления свыше 100 дБ колебательная скорость частиц достигает величин 0,01 м/с, что приводит к возбуждению механорецепторов. Возбуждение этих рецепторов формирует у человека чувство вибрации тела, головы и внутренних органов. Поэтому при воздействии на человека акустических полей высоких уровней часто используется термин «воздушная вибрация» [24]. При уровне звукового давления свыше 140 дБ можно прогнозировать развитие болевых ощущений, в первую очередь в области барабанных перепонки и внутренних органах [11, 18].

В лабораторных испытаниях установлено, что порог вибротактильной чувствительности у человека соответствует их уровню 100–110 дБ [37]. Увеличение уровня звукового давления свыше 125 дБ вызывает ощущение «воздушной вибрации» всего тела [24, 34]. Доказательством этого являются экспериментальные исследования с испытуемыми, когда воздействию акустических колебаний (частотой 125 и 350 Гц при уровне звукового давления 125 дБ) подвергались обнаженная грудь, живот и руки, при этом уши и голова были надежно защищены шлемом. После воздействия отмечено повышение порога вибротактильной чувствительности, а также уровня артериального давления и ухудшение показателей психофизиологических тестов. Кроме того, эти лица предъявляли жалобы на усталость, головную боль, нарушение сна и ощущение вибрации отдельных участков тела и внутренних органов. Последнее явление объяснили активацией интеро- и проприоцепторов. Исследованиями, выполненными на генетически глухих людях или мышах и на животных с двусторонне разрушенным органом слуха, убедительно доказана роль механорецепторов в восприятии низкочастотных акустических колебаний. В результате было установлено ухудшение ряда физиологических показателей, в том числе и физической работоспособности. При уровне звукового давления свыше 140 дБ наблюдаются болевые ощущения, в первую очередь в области барабанных перепонки и внутренних органах.

В лабораторных экспериментальных исследованиях на крысах показано изменение импульсной активации седалищного нерва, что свидетельствовало о непосредственном восприятии механорецепторами низкочастотных акустических колебаний [1].

Таким образом, полученные данные убедительно свидетельствуют, что низкочастотные акустические колебания оказывают прямое воздействие на механорецепторы, что лежит в основе формирования биологических эффектов.

Невысокая скорость распространения в тканях упругих волн при низкой частоте их следования ведет к появлению волн, соизмеримых с размерами клеток или клеточных органелл. Величина деформационных сдвигов при распространении акустических колебаний зависит не только от уровня звукового давления, но и находится в обратной зависимости от частоты. При низких частотах (ниже 250 Гц) и высоких уровнях звукового давления она достигает нескольких миллиметров, а при инфразвуке – нескольких сантиметров. Это может вызывать синхронизированные конформационные колебания макромолекул, а значит, приводить к изменению размеров и формы клеточных органелл. Деформационные сдвиги в биологических структурах могут приводить к структурным нарушениям в виде тканевых и висцеральных повреждений. Кроме того, этому способствует то обстоятельство, что

тело человека состоит из тканей, имеющих большую разницу в механических свойствах [5] (табл. 5), поэтому на границе раздела тканей с высокой разницей плотности (воздух/ткань, воздух/жидкость, жидкость/ткань) при прохождении акустических колебаний по тканям будут возникать повышенные механические напряжения вплоть до структурных повреждений органов (легкие, головной мозг, сердце) и сосудов, особенно мелких [11].

Таблица 5

Величина скорости звука и удельной плотности биологических тканей человека

Биологическая ткань	Скорость звука, м/с	Удельная плотность, кг/м ³
Кость	3300	1920
Кровь	1590	1048–1066
Кожа	1610	1093–1121
Вода	1500	1000
Легкие	70	260

Вестибулярные эффекты

Воздействие низкочастотных акустических колебаний наряду с изменениями слухового анализатора ведет также к нарушениям вестибулярного аппарата. Определенным объяснением этого является близкое анатомическое расположение ушного лабиринта и спирального органа и, по-видимому, нахождение области собственных частот этих органов в диапазоне 2–20 Гц. В лабораторных условиях влияние низкочастотных акустических колебаний свыше уровня 100 дБ, по данным некоторых авторов, вызывало у испытуемых появление субъективных ощущений в состоянии (головокружение, тошнота, нарушение равновесия) вместе с объективными признаками (снижение статокINETического равновесия, нистагма), что убедительно свидетельствовало о нарушении функции вестибулярного анализатора. По другим источникам, указанные вестибулярные нарушения появляются только при уровне звукового давления 140–155 дБ. К тому же наличие функциональных сдвигов нуклеиновых кислот в рецепторных клетках полукружных каналов у морских свинок после одно- и многократных воздействий инфразвука (8 и 16 Гц при уровне звукового давления 90–120 дБ) указывало на возможность истощения в них энергетических и пластических ресурсов по типу утомления [7, 26].

Клиническое обследование рабочих, систематически подвергавшихся влиянию низкочастотного шума в производственных условиях, выявило у них повышенную возбудимость вестибулярного аппарата.

Механизм возбуждения рецепторных структур вестибулярного анализатора некоторые авторы объясняют энергией низкочастотных акустических колебаний, которые вызывают перемещение жидкости и образование вихревых потоков в лабиринте. Другие этот эффект связывают с резонансным возбуждением клеток, структур внутреннего уха, возможно, и отолитов в результате непосредственного действия на них акустических колебаний. Кроме того, данные расстройства могут иметь и центральное происхождение из-за нарушения корково-подкоркового и стволового взаимодействия, тем самым создаются условия для формирования соматических и вегетативных рефлексов [7, 24, 36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании натуральных и лабораторных исследований показано, что низкочастотные акустические колебания вызывают у человека и животных не только слуховые (ауральные) эффекты, но и оказывают общее действие (экстраауральные эффекты). Последние присущи акустическим колебаниям с частотой ниже 170–200 Гц и уровнем звукового давления свыше 100 дБ. Воздействие низкочастотных акустических колебаний на различные органы надо в первую очередь рассматривать с позиции взаимодействия механических систем, так как они, проникая в тело человека, оказывают прямое воздействие на все органы. С нашей точки зрения, легкие находятся в наиболее неблагоприятных условиях:

- наличие воздушного сообщения с окружающей средой дает возможность низкочастотным акустическим колебаниям проникать в легкие не только через поверхность тела, но и большие воздухоносные пути;

- воздушность органа и сложное морфологическое строение из тканей различной плотности создают значительную акустическую неоднородность и приводят к возникновению деформаций на границе раздела сред с разными акустическими импедансами;

- большая наружная и огромная внутренняя поверхность легких по сравнению с другими органами позволяет им поглощать большое количество звуковой энергии;

- соответствие частоты собственных колебаний грудной клетки и легких частотному диапазону низкочастотных акустических колебаний приводит к возникновению резонансных явлений в органе при действии внешних механических колебаний, что может быть ведущей причиной структурных нарушений.

В результате выполнения экспериментальных работ было показано, что параметры низкочастотных акустических колебаний (уровень звукового давления, частота, длина и площадь импульса), измеренные снаружи и внутри грудной клетки и черепа животных, различаются незначительно. Полученные данные позволяют утверждать, что низкочастотные акустические колебания оказывают прямое действие на легкие, головной мозг и другие внутренние органы. Известно, что при распространении акустических волн в среде возникают и механические деформации, распространяющиеся со скоростью, зависящей от упругих свойств и плотности среды. При распространении акустической волны происходит перенос энергии упругой деформации. Основываясь на результатах исследований зарубежных и отечественных авторов [5, 30], можно выделить три группы тканей в организме человека и животных, различающихся по акустическим свойствам. К первой группе относится костная ткань (по своим акустическим свойствам близкая к твердому телу, например металлу), в которой скорость продольной акустической волны достигает $2500\text{--}4500\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Вторая группа биологических тканей (кожа, селезенка, мышечная ткань, мозг, печень, почки) и жидкостей (кровь, ликвор) по своим акустическим свойствам имеет сходство с водой, где скорость звука равна $1500\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Максимальное отклонение от среднего значения составляет для этих тканей всего лишь 7–10%, что обуславливает прохождение акустической волны через их границу с малыми потерями.

Легкие вошли в третью группу тканей, скорость акустической волны в них значительно меньше, чем в первых двух группах, и, по данным разных авторов, составляет менее $70\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ из-за анатомо-морфологических особенностей органа дыхания. Легкие представляют собой сложную структуру, где 10% их объема занимают большие воздухоносные пути и кровеносные сосуды и 90% – паренхима, которая состоит из альвеол, альвеолярных ходов и мешочков, капилляров, артериол и венул [36, 38–40].

В результате высокого содержания в легких воздуха они имеют значительно меньшую плотность ($0,26 \text{ г}\cdot\text{мл}^{-1}$), чем другие ткани. Скорость звука в них *D.A. Rice* (1983) предложил определять по формуле

$$C = B/\rho,$$

где C – скорость звука, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; B – объемная жесткость, Па; ρ – плотность, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Из-за малой скорости звука в легочной ткани длина волны акустического сигнала при умеренно высоких частотах (\sim единицы кГц) может оказаться соизмеримой с размерами клеток или клеточных органелл. Это может привести к синхронизированным конформационным колебаниям макромолекул, а значит, и к изменению размеров и формы клеточных органелл, то есть к повреждению клеток.

К тому же легочная паренхима представляет собой сложный материал с высокой акустической неоднородностью. Так, эластический каркас и сосудистое русло имеют близкий акустический импеданс – $144000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, а воздух – только $440 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ [5]. Кроме того, акустические волны с различной скоростью могут распространяться через легкие по нескольким путям: большим воздухоносным путям, кровеносным сосудам и паренхиме. Большое различие в скорости звука и акустических импедансах в самих легких, а также между легкими и близлежащими анатомическими образованиями приводит к очень сильному рассеянию акустической волны на границе с высоким нелинейным отношением нагрузка-напряжение и появлению волн отражения, рефракции и фокусирования или, в зависимости от интенсивности акустического поля, кавитации, что создает условия для механического повреждения легких.

Заслуживают внимания результаты экспериментальных исследований, в которых было доказано появление кавитации в жидкостях при воздействии низкочастотных акустических колебаний (10–200 Гц). Как правило, возникает два типа кавитационных пузырьков – мелкие сферические и большие деформированные пузырьки. Движение и расщепление пузырьков первого типа сопровождается преобразованием акустической энергии в энергию пластической деформации или возникновением химических реакций с образованием высокоагрессивных радикальных продуктов расщепления H_2O . С активностью пузырьков второго типа может быть связано появление акустических микропотоков, высоких сдвиговых напряжений и механических разрушений [25].

Существует несколько гипотез возникновения и развития кавитации в жидкости и тканях. При распространении акустических колебаний небольшой интенсивности в реальной жидкости присутствующие в ней микропузырьки начинают пульсировать синфазно с полем. Возникновение химических реакций и механических повреждений связано с повышением интенсивности акустических колебаний. В некоторый момент, называемый порогом развитой кавитации, спонтанно возникает какой-либо один (или несколько) из перечисленных эффектов. Установлено, что при интенсивностях акустических полей $< 150 \text{ дБ}$ в исследуемом объеме может присутствовать 1–2 пузырька второго типа, а при интенсивности 160 дБ число мелких пульсирующих пузырьков может превышать число крупных пузырьков на 1–2 порядка и более.

Из вышеизложенного следует, что низкочастотные акустические колебания, свободно проникая в грудную клетку, оказывают прямое действие на легкие. Морфологические особенности органа дыхания способствуют распространению этих акустических колебаний в нем в виде упругих колебательных волн с небольшой скоростью, что может усилить конформационные колебания макромолекул вплоть до повреждения клеток. Акустическая неоднородность легких по сравнению с другими органами, в том числе и головным мозгом, приводит к появлению более высоких деформационных нагрузок при действии низкочастотных акустических колебаний. Известно, что деформация бывает упругой (обратимой) или пластической (необратимой).

Поэтому в одном случае орган или его элементы, отреагировав деформацией на акустическое воздействие, сохраняют свою конструкцию (физическую структуру), в другом случае происходит их деструкция. В сложной гетерогенной системе, какой являются легкие, можно ожидать проявления различных видов деформации, которая определяется в первую очередь акустическими особенностями, а те в свою очередь обусловлены механическими свойствами тканей (прочностью, упругостью, эластичностью) как внутри органа, так и между органом и окружающей его средой. Пластическая деформация должна наблюдаться, во-первых, на границе раздела сред ткань/воздух, то есть на субплевральной поверхности легких и в альвеолах, а во-вторых, в механически наиболее слабых участках. Известно, что в органах, обладающих «сосудисто-соединительнотканым» скелетом, таковым является сосудистое, и прежде всего капиллярное русло. С увеличением интенсивности акустического поля возрастает вероятность появления не только деформации, но и кавитации, что приводит к еще большей деструкции легочной паренхимы. При длительном (хроническом) действии акустических полей умеренной интенсивности превалирует упругая деформация, что приводит к постоянному механическому напряжению в различных отделах легких, накоплению остаточной деформации и постепенному разрушению легочного каркаса, и в итоге к развитию эмфиземы легких [11, 12, 18].

Таким образом, доказано, что низкочастотные акустические колебания изменяют биомеханическое состояние живой системы, вызывая акустическое напряжение в гетерогенных средах и деформацию в органах в целом и (или) отдельных его участках. При этом биологический эффект воздействия низкочастотных акустических колебаний определяется как физическими критериями (интенсивность, длительность, частота), так и особенностями конструкции (структуры) облучаемых органов. Наличие столь многих реально взаимодействующих элементов, определяющих эффект акустического взаимодействия, требует в каждом конкретном случае детального их учета для объективной оценки условий и прогнозирования эффекта воздействия низкочастотных акустических колебаний на организм. Механическое повреждение вызывает нарушение целостности структуры ткани, клеток, субклеточных и межклеточных структур. Специфическим повреждениям клеток обычно сопутствуют (или следуют за ними) и общие неспецифические проявления повреждения (нарушение проницаемости, повреждение липидных компонентов клеточных и субклеточных мембран, изменение активности внутриклеточных ферментов и др.).

Прямым доказательством подтверждения описанных механизмов действия являются экспериментальные работы, в которых показано, что низкочастотные акустические колебания способны вызывать в ряде органов (головном мозге, сердце, печени и др.) морфофункциональные нарушения вплоть до структурных повреждений тканей, сосудов [2, 3, 32, 33].

Изложенные положения позволяют утверждать:

- 1) акустические колебания инфразвукового и низкочастотного звукового диапазона имеют сходство в механизмах действия на крупные биообъекты (человек, собака и др.);
- 2) биомеханические механизмы действия инфразвука и низкочастотного шума необходимо учитывать при гигиеническом нормировании шума и инфразвука;
- 3) низкочастотные акустические колебания вызывают неблагоприятные ауральные и экстраауральные эффекты, что требует разработки специальных средств защиты тела и головы – экстраауральных протившумов (противошумный жилет и противошумный шлем). Основанием для их применения является наличие в спектре производственного шума низкочастотных акустических колебаний уровня звукового давления свыше 90–100 дБ [8, 18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акоев Г.Н., Потехина И.Л., Зинкин В.Н. [и др.]. Анализ влияния импульсного шума на механорецепторы млекопитающих // Тр. науч. конф. – СПб.: Изд-во СПбГМУ, 1999. – С. 73–74.
2. Ахметзянов И.М., Жинь К.П., Зинкин В.Н. [и др.]. Функциональные проявления действия импульсного шума на легкие крыс // Функциональная анатомия сосудистой системы. – СПб., 1997. – С. 116–118.
3. Ахметзянов И.М., Гребеньков С.В., Ломов О.П. Шум и инфразвук. Гигиенические аспекты. – СПб.: Бип, 2002. – 100 с.
4. Ахметзянов И.М., Зинкин В.Н., Петреев И.В., Драган С.П. Гигиеническая оценка сочетанного действия шума и инфразвука на организм военнослужащих // Военно-мед. журн. – 2011. – № 11. – С. 44–50.
5. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. – Киев: Наукова думка. – 1990. – 224 с.
6. Борьба с шумом на производстве: справочник / под общ. ред. Е.Ю. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
7. Ерохин В.Н., Попова Т.М. Гистохимические исследования рецепторных образований вестибулярного аппарата в ответ на инфразвуковое воздействие // Физ. факторы производственной среды. – Л., 1980. – С. 28–30.
8. Жданько И.М., Зинкин В.Н., Солдатов С.К. [и др.]. Фундаментальные и прикладные аспекты профилактики неблагоприятного действия авиационного шума // Авиакосм. и экол. медицина. – 2014. – Т. 48, № 4. – С. 5–16.
9. Зинкин В.Н. Современные аспекты контроля и мониторинга инфразвука как вредного производственного фактора на транспорте и промышленных объектах // Акт. проблемы транспортной медицины. – 2014. – Т. 2, № 4. – С. 10–25.
10. Зинкин В.Н. Современные проблемы производственного шума // Защита от повышенного шума и вибрации: сб. докл. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – СПб., 2015. – С. 36–56.
11. Зинкин В.Н. Биофизические основы действия акустических колебаний // Системный анализ в медицине (САМ 2016): материалы X междунар. науч. конф. – 2016. – С. 13–17.
12. Зинкин В.Н., Свидовый В.И., Ахметзянов И.М. Неблагоприятное влияние низкочастотных акустических колебаний на органы дыхания // Профилактикт. и клин. медицина. – 2011. – № 3. – С. 280–284.
13. Зинкин В.Н., Ахметзянов И.М., Драган С.П. [и др.]. Особенности сочетанного действия шума и инфразвука на организм // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 9. – С. 2–10.
14. Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Ахметзянов И.М., Шешегов П.М. Авиационный шум: специфические особенности биологического действия и защиты // Авиакосм. и экол. медицина. – 2012. – Т. 46, № 2. – С. 9–16.
15. Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Драган С.П. [и др.]. Кумулятивные медико-экологические эффекты сочетанного действия шума и инфразвука // Экология и промышленность России. – 2012. – № 3. – С. 46–49.
16. Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. [и др.]. Медико-социальные аспекты экологической безопасности населения, подвергающегося кумулятивному действию авиационного шума // Экология промышл. производства. – 2012. – № 2. – С. 9–14.
17. Зинкин В.Н., Ахметзянов И.М. Экологические, производственные и медицинские аспекты инфразвука // Защита от повышенного шума и вибрации: сб. докл. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – СПб., 2013. – С. 177–198.
18. Зинкин В.Н., Ахметзянов И.М., Орихан М.М. Инфразвук как вредный производственный фактор // Безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 9. – С. 2–9.
19. Иванов Н.И., Шашаурин А.Е., Буторина М.В. Законодательное урегулирование в области шума в Российской Федерации: недостатки и пути улучшения // Защита от повышенного шума и вибрации: сб. докл. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – СПб., 2017. – С. 15–24.
20. Измеров Н.Ф., Суворов Г.А., Куралесин Н.А. [и др.]. Инфразвук как фактор риска здоровью человека (гигиенические, медико-биологические и патогенетические механизмы). – Воронеж, 1998. – 275 с.
21. Измеров Н.Ф., Суворов Г.А., Прокопенко Л.В. Человек и шум. – М.: ГЕОТАР-МЕД, 2001. – 384 с.
22. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / под ред. Н.И. Иванова. – М.: Логос, 2013. – 432 с.
23. Карпова Н.И., Малышев Э.Н. Низкочастотные акустические колебания на производстве. – М.: Медицина, 1981. – 192 с.
24. Крылов Ю.В., Фролов Н.И., Кузнецов В.С. [и др.]. Воздействия авиационного шума на организм // Военно-мед. журн. – 1977. – № 2. – С. 57–59.
25. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция. – М.: Химия, 1986. – 288 с.

26. Нехорошев А.С., Глинчиков В.В. Механизм действия инфразвука на рецепторы ушного лабиринта // Косм. биология и авиакосм. медицина. – 1990. – № 6. – С. 39–42.
27. О состоянии профессиональной заболеваемости в Российской Федерации в 2013 году: информ. сб. стат. и аналит. материалов / под ред. главного врача ФБУЗ ФЦГиЭ Роспотребнадзора, к.м.н. Верещагина А.И.; Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – М., 2014. – 60 с.
28. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2013 году: гос. доклад; Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия. – М., 2015. – 200 с.
29. Плужников Н.Н., Владимиров В.Г., Зинкин В.Н. [и др.]. Исследование некоторых механизмов повреждающих эффектов низкочастотных шумов // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2001. – Т. 41, № 1. – С. 67–72.
30. Применение ультразвука в медицине. Физические основы: пер. с англ. / под ред. К. Хилла. – М.: Мир, 1989. – С. 244–254.
31. Руководство по оториноларингологии / под ред. И.Б. Солдатова. – М.: Медицина, 1994. – 608 с.
32. Симухин В.В. Медико-биологические эффекты воздействия импульсных шумов сверхвысокой интенсивности // Мед.-биол. и социально-психолог. проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2012. – № 4. – С. 69–72.
33. Симухин В.В., Ворона А.А., Богомолов А.В. [и др.]. Медико-биологические эффекты импульсных шумов и особенности их гигиенического нормирования // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – №6. – С. 36–43.
34. Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. Т. 2. Основы космической биологии и медицины / под ред. О.Г. Газенко, М. Кальвина. – М.: Наука, 1975. – С. 399–400.
35. Gierke U. Effects of infrasound of man // Colloq. inter. CNRS. – Paris, 1974. – P. 415–435.
36. Infrasound and low frequency vibration / Ed. W. Tempest. – London: Acad. Press, 1976. – 364 p.
37. Kraman S.S. Speed of low frequency sound through lungs of normal man // J. Appl. Physiol. – 1983. – Vol. 55, no. 6. – P. 1862–1867.
38. Landstrom U. Occupational aspects of infrasound and whole body vibrations // Arh. Hig. Rada Toksikol. – 1983. – Vol. 34. – P. 287–293.
39. Rice D.A. Central to peripheral sound propagation in excised lung // J. Acoustic Soc. Amer. – 1987. – Vol. 82, no. 4. – P. 1139–1144.
40. Rice D.A. Sound speed in pulmonary parenchyma // J. Appl. Physiol. – 1983. – Vol. 54, no. 1. – P. 304–308.
41. Yen R.T., Fung Y.C., Ho H.H., Butterman G. Speed of stress wave propagation in lung // J. Appl. Physiol. – 1986. – Vol. 61, no. 2. – P. 701–705.

BIOMECHANICAL MECHANISMS OF ACTION OF LOW-FREQUENCY ACOUSTIC VIBRATIONS ON A PERSON

N.I. Ivanov, V.N. Zinkin (Saint-Petersburg, Russian Federation), L.P. Slivina (Volgograd, Russian Federation)

The aim of this work to substantiate the mechanisms of action of low-frequency acoustic vibrations on humans, caused by mechanical interaction of acoustic oscillations with the anatomical structures of the body. One of the modern features of industrial noise is the domination noise spectrum of the low frequency noise and infrasound with high intensity. To characterize these ranges, the scientific literature uses the term low-frequency acoustic oscillations, due to similar physical properties and biological effects on the human body and animals. It is proven that infrasound has negative effects on many organs (respiratory, hearing, vision, etc.) and human systems (central and autonomic nervous, etc.) and leads to the development of diseases, including professional (sensorineural hearing loss, vestibulopathy, autonomic disorders). On this basis, infrasound is included in the list of harmful production factors. A number of biological effects is formed by a direct mechanical interaction of acoustic oscillations with the anatomical structures of the human body.

The length of the acoustic wave and its intensity are decisive parameters for the formation of a reaction in the human body. The interaction of low frequency acoustic oscillations with the anatomical structures of the body must be considered as the interaction of two mechanical systems that leads to the development of various physical effects in tissues and organs (diffraction, resonance, elastic waves, cavitation, etc.). The latter are the basis of the direct action of acoustic oscillations and lead to anatomical damage of the tissues, a conformational disturbance of cellular structures and macromolecules, activation of receptors (mechano-, proprio, vestibuloadaptive, etc.). Biomechanical effect of low-frequency acoustic oscillations should be taken into account in the normalization of low frequency sound range, and determining ways and means of protection from low-frequency acoustic oscillations not only the organ of hearing and the head and internal organs.

Key words: low-frequency acoustic oscillations, mechanisms of action, wavelength, sound pressure level, sound conductivity, resonance, protection.

Получено 23 марта 2018