CZU: 504.6:611/612 **https://doi.org/10.59295/sum6(186)2025_08**

ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Ирина КОЛОМИЕЦ,

Молдавский государственный университет

Работа посвящена комплексному анализу влияния акустических колебаний на живые системы – от клеточного уровня до целостного организма человека. Рассматриваются физические параметры звука (частота, амплитуда, длина волны, среда распространения) и их биофизические эквиваленты, определяющие характер физиологического отклика. Показано, что звук способен выступать как стрессор, так и терапевтический агент. Установлена связь между воспринимаемыми звуковыми частотами и биоритмами головного мозга: если частота воспринимаемого звукового сигнала совпадает или кратна одному из внутренних ритмов мозга (β-, α-, θ-, δ-диапазонам), происходит резонансное возбуждение соответствующих нейронных центров с характерными физиологическими реакциями; нарушение кратности частот, напротив, вызывает интерференционные (шумовые) эффекты в коре головного мозга.

Ключевые слова: *акустика, звуковое восприятие, ультразвук, инфразвук, шумовое загрязнение, физиологическое действие звука, β-, α-, θ-, δ-диапазон ритмов мозга.*

THE INFLUENCE OF ACOUSTIC VIBRATIONS ON THE HUMAN BODY

The study presents a comprehensive analysis of the influence of acoustic oscillations on living systems – from the cellular level to the entire human organism. It examines the physical parameters of sound (frequency, amplitude, wavelength, and propagation medium) and their biophysical equivalents that determine physiological responses. It is shown that sound can act both as a stressor and as a therapeutic agent. A connection has been established between perceived sound frequencies and brain biorhythms: if the frequency of the perceived sound signal coincides with or is a multiple of one of the brain's internal rhythms (β-, α-, θ-, δ-ranges), resonant excitation of the corresponding neural centers occurs, with characteristic physiological reactions; a violation of the frequency multiplexity, on the contrary, causes interference (noise) effects in the cerebral cortex.

Keywords: *acoustics, sound perception, ultrasound, infrasound, noise pollution, physiological effects of sound, β -, α -, θ -, δ - ranges of the brain's rhythms.*

Введение

Наличие атмосферы и гидросферы на нашей планете является уникальным условием возникновения бесконечного разнообразия и по форме, и по интенсивности механических колебаний. Однако, все виды проявления механической энергии (гравитация, давление, колебания) – суть явления космического порядка, как и другие физические факторы: свет, теплота, радиация [1]. Совокупность данных факторов формировала таксономические признаки живых организмов, населяющих Землю и их адаптивные границы, определяла ареалы и экологические ниши вида. В процессе эволюции вида в природе выживали и оставляли потомство наиболее приспособленные к условиям среды особи, передавая свои полезные признаки потомству [2]. Изменения качественных и/или количественных характеристик экологического фактора приводили к изменениям адаптивных границ вида, если скорость воспроизведения вида соответствовала скорости изменения фактора. Если скорость изменения фактора значительно превышала скорость воспроизведения вида, то такой таксон был обречен на вымирание или значительное уменьшение численности [3]. Обычно такие последствия происходили в результате глобальных или локальных экологических катастроф [4, 5].

Одним из фундаментальных законов биологии является закон, касающийся взаимоотношений живой материи со средой, ее окружающей. Основные требования этого закона направлены на со-

хранение всех функций живой материи при различных флуктуациях среды. Именно для этих целей в процессе эволюции жизни на Земле и возник уникальный биологический закон: в ответ на действия факторов внешней среды повышать сопротивляемость этому действию, преодолевать его в целях сохранения целостности живой системы (хотя этот закон является лишь частным проявлением принципа Ле Шателье – Брауна: если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, воздействовать извне, изменяя какое-либо из условий равновесия – температуру, давление, концентрацию, внешнее гравитационное, электромагнитное поле то в системе усиливаются процессы, направленные на компенсацию внешнего воздействия) [6]. Способность оценивать характер действия факторов внешней среды и, в случае необходимости, проявлять такую реакцию, которая обеспечит нормальную жизнедеятельность, – является уникальным свойством живой материи, свойством эволюционной компенсации, реализующимся через геном вида. Этим свойством обладают живые системы всех уровней – от клеток простейших до человека. Необходимость оценки опасности фактора для жизни привела к появлению специфических органов, способных воспринимать тот или иной тип раздражителя и формировать ответную реакцию.

В ряду постоянных экологических факторов, воздействующих на все живые организмы, гравитация, давление и механические колебания, включая акустические, пожалуй, одни из самых распространенных как во времени, так и в пространстве. Звук, слышимый человеком, составляет лишь малую область частотного спектра механических колебаний, существующих в природе. Говоря об адаптивных границах различных таксономических групп к звуковому раздражителю, следует отметить, что, когда речь идет о чувствительности особи к акустическим колебаниям, имеется в виду чувствительность органа слуха и его специфических рецепторных клеток. По этой причине воздействие звуковых раздражителей на нерецепторные клетки до недавних пор не было предметом исследований. Однако накопленный эмпирический материал по влиянию шумового загрязнения на здоровье населения свидетельствует о том, что повышенные шумовые нагрузки приводят не только к нарушению функционирования органа слуха, но и к ряду заболеваний, не связанных напрямую со слуховыми рецепторами [7]. В связи с чем, цель данной работы сводилась к анализу данных по воздействию акустических волн как на специфические, так и на неспецифические клетки.

Методы и материалы

В ходе анализа применяли метод последовательных паттернов (SP – sequence pattern), заключающийся в обнаружении закономерностей или серии событий, происходящих в определенной последовательности [8]. Методологической основой исследований был системный подход [9]. В качестве объекта исследования рассматривались биологические системы на всех уровнях организации – от глобального до молекулярного. Визуализация результатов осуществлялась при помощи пакета программ „Excel”.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Звуковые колебания

Под звуковыми или акустическими волнами принято понимать механические волны с частотой колебаний от 16 до $2*10^4$ Гц, которые вызывают у человека звуковые ощущения. Волны с частотами меньше 16 Гц называют инфразвуковыми, волны с частотами больше $2*10^4$ Гц – ультразвуковыми, а волны с частотами больше $1*10^8$ Гц – гиперзвуковыми. Звуки разделяют на несколько видов: удар, тон и шум. Несмотря на общую природу звуковых волн, их влияние на биологические системы проявляется по-разному. Принято считать, что шум оказывают негативное воздействие на человека, а музыка – благотворное [10]. Причина таких диаметрально противоположных воздействий акустической волны на организм человека вызывает как теоретический, так и прикладной интерес. Для сравнения трех типов звуковых волн необходимо описать их качественные и количественные характеристики (параметры). Количественные характеристики звуков включают амплитуду, интенсивность (скалярную величину мощности), частоту, длину волны и скорость, в то время как качественные характеристики включают громкость, тон и тембр.

3.2. Количественные характеристики звуковых колебаний

Скорость звука – это скорость распространения упругих волн в среде. Определяется упругостью и плотностью среды: как правило, в газах скорость звука меньше, чем в жидкостях, а в жидкостях – меньше, чем в твёрдых телах. В приближенном варианте скорость звука в воздухе (V) вычисляют по формуле:

$$V=332+0,6*T \quad (1)$$

Скорость звука в воздухе, как и длина волны, зависит от температуры и в нормальных условиях составляет примерно 340 м/с. В качестве примера приведём таблицу величин скорости распространения звука в различных средах (таблица 1).

Таблица 1. Скорости распространения звука До и Си малой, третьей и пятой октавы в различных средах при температуре 0°С [11]

Среда	Скорость звука, м/сек	Частота колебаний, Гц					
		130,81 До М	246,94 Си М	1045,50 До Ш	1975,00 Си Ш	4186,08 До V	7902,08 Си V
		Длина волны звука, м					
Воздух	331	2,53	1,34	0.32	0,17	0,08	0.04
Вода	1450	11,08	5,87	1,39	0,73	0,35	0,18
Медь	3800	29,05	15,88	3,63	1,92	0,91	0,48
Дерево	4800	36,69	19,44	4,59	2,43	1,15	0,61
Железо	4900	37,46	19,84	4,69	2,48	1,17	0,62
Сталь	5600	42,81	22,68	5,36	2,84	1,34	0,71

Длина звуковой волны (расстояние между соседними идентичными частями) связана с частотой как:

$$\lambda =(332+0,6*T)/f \quad (2)$$

где Т—температура воздуха в градусах Цельсия, f – частота в Гц, а длина волны λ – в метрах.

Под амплитудой звука понимают максимальное отклонение звуковой волны от положения равновесия. Амплитуда тесно связана с интенсивностью звуковой волны - мерой энергии, переносимой через заданную площадь. Интенсивность определяется давлением звуковой волны на единицу поверхности. Имеющиеся литературные данные [12] позволяют сделать вывод, что звуковые волны различных частотных диапазонов в зависимости от интенсивности могут проявлять как положительный, так и отрицательный эффект.

Так инфразвук, порожденный естественным и техногенным путем, может оказывать как негативное, так и положительное влияние на организм человека. В первом случае источниками инфразвука являются ветер, волны, землетрясения, а во втором – строительство, транспорт, кондиционеры, неисправная бытовая техника. Низкочастотный звук, генерируемый естественным путем, транспортом или при строительстве, является причиной сообщений о сверхъестественных явлениях и призраках, поскольку 19 Гц соответствует резонансной частоте глазного яблока. Была выявлена связь между воздействием низкочастотного шума и проявлениями раздражительности, проблемами со сном, головной болью и трудностями с концентрацией внимания [10]. Инфразвук вызывает резонанс внутренних органов, что может привести к проблемам со здоровьем. Волны в диапазоне 0,5-10 Гц и амплитудой 80 дБ могут привести к психоэмоциональным изменениям: чувству беспокойства, страха, депрессии, ощущению тяжести в груди и даже галлюцинациям. Стив Гудман, автор книги «Акустическая война: звук, аффект и экология страха», выделяет диапазон частот 7-8 Гц как самый опасный для человека, так как он близок к частоте альфа-ритма нашего мозга [12]. При частоте 1–10 Гц действие мозгового вещества физиологически блокируется, а его вегетативные функции пре-

кращаются. На частоте 4,3–7,3 Гц наблюдается снижение остроты зрения, показатели IQ снижаются до 77% от нормальных, нарушается пространственная ориентация, координация работы мышц, равновесие, речь становится невнятной, происходит потеря сознания. Учитывая такое воздействие инфразвука на человеческий организм, было создано оружие дальнего радиуса действия – LRAD. Акустический прибор дальнего радиуса действия LRAD используется правоохранительными органами для усмирения беспорядков. LRAD, установленный на некоторых полицейских машинах, обладает продолжительной громкостью 162 дБ. Болевой порог для большинства людей составляет около 130 дБ, и именно это делает устройство таким эффективным.

Выявлен и положительный эффект при воздействии инфразвука на организм человека. Группа ученых [13] провела эксперимент с использованием магнитно-резонансной томографии, в котором 13 участников без тяжелых патологий и неврологических заболеваний подвергались воздействию инфразвука. Во время выполнения задания вспышки инфразвука с частотой 12 Гц поступали в одно ухо с индивидуально определенным уровнем звукового давления. Было выявлено, что выполнение задания сопровождалось значительной активацией париетальной и префронтальной коры наряду с полосатым телом и мозжечком. Наблюдалась также активация билатеральной первичной слуховой коры. В результате была обнаружена тенденция улучшения выполнения задания во время воздействия инфразвука, что может свидетельствовать о потенциальном улучшении рабочей памяти.

Особенности воздействия на организм человека звуков слухового диапазона отличается от предыдущего прежде всего тем, что человек не только способен воспринимать его частотный диапазон, но и быть его источником. Частота определяет высоту звука. Чем больше частота, тем выше звук (диаграмма 1). Голос типичного взрослого мужчины имеет фундаментальную частоту от 85 до 155 Гц, типичной взрослой женщины от 165 до 255 Гц.

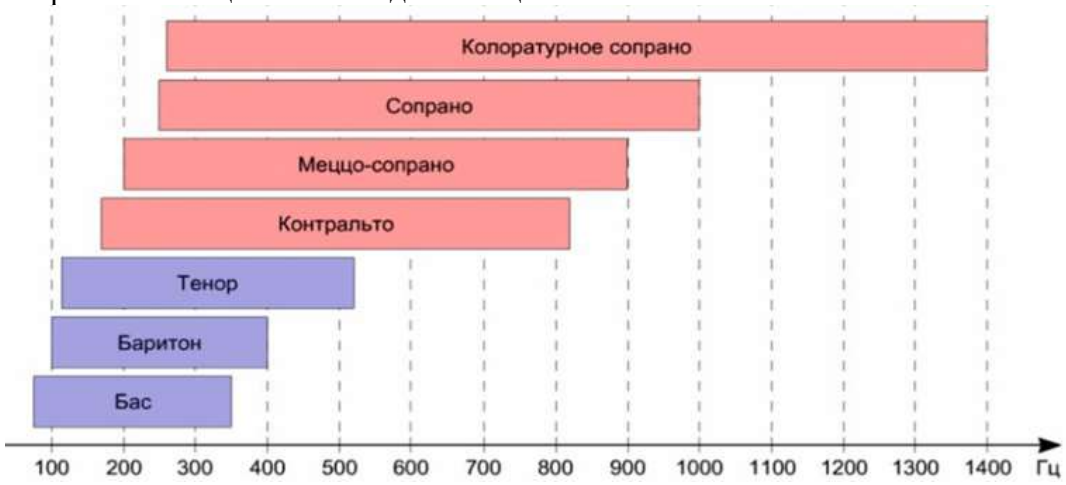


Диаграмма 1. Частотный диапазон мужских (синие) и женских (красные) певческих голосов [14]

Таким образом, фундаментальная частота большинства голосов ниже нижнего предела «голосовой частоты». Следовательно, человеческий слуховой аппарат настроен на восприятия диапазона частот, совпадающего с диапазоном человеческого голоса, что свидетельствует о коэволюционном развитии речевых и слуховых функций. В переводе на технический язык человеческий организм может функционировать как приемник и как передатчик сигнала. Мы предполагаем, что модулирующими (фундаментальными) частотами при этом являются beta-, alpha-, theta- и delta- частоты головного мозга (таблица 2). Если частота воспринимаемого звука кратна или равна модулирующей частоте, то он вызывает возбуждение соответствующих ему центров в коре головного мозга и сопутствующие им реакции организма. Если частота воспринимаемого звука не кратна модулирующей частоте, то он вызывает «смещенное возбуждение» в коре головного мозга, на техническом языке – «помехи восприятия» или «шумы». В связи с чем, человек не различает консонанс от диссонанса. Причина амузии – отсутствие музыкального слуха, или тональная глухота возможно связана с

нарушением ритмов головного мозга (кратность в октавных рядах не равна 2). Согласно одному из исследований [15] от амузии (неврологического расстройства) страдает порядка 4% населения Земли. Так как при отсутствии музыкального слуха человек не может различать ноты, он не слышит музыку, а точнее – мозг не идентифицирует музыку. Она звучит для таких людей как шум: звук работающего холодильника, фена или перфоратора.

Таблица 2. Модулирующие (фундаментальные) частоты головного мозга инфразвукового диапазона

ν, Гц	Инфразвуковой диапазон					Слышимый диапазон			
Октава	V (δ)	IV (δ)	III (δ)	II (θ)	I (α)	суббконтр (β)	контр	большая	малая
До	0,51	1,02	2,04	4,08	8,17	16,35	32,70	65,41	130,82
До #	0,54	1,08	2,16	4,33	8,66	17,32	34,65	69,30	138,59
Ре	0,57	1,14	2,29	4,58	9,17	18,35	36,71	73,42	146,83
Ре #	0,61	1,21	2,43	4,86	9,72	19,45	38,89	77,78	155,57
Ми	0,65	1,31	2,62	5,15	10,30	20,60	41,20	82,41	164,82
Фа	0,68	1,36	2,73	5,46	10,92	21,83	43,65	87,31	174,62
Фа #	0,72	1,44	2,89	5,78	11,56	23,12	46,25	92,50	185,00
Соль	0,77	1,54	3,08	6,17	12,25	24,50	49,00	98,00	196,00
Соль #	0,81	1,62	3,24	6,48	12,98	25,96	51,91	103,83	207,65
Ля	0,85	1,71	3, 43	6,87	13,75	27,50	55,00	110,00	220,00
Ля #	0,91	1,82	3,64	7,28	14,57	29,14	58,27	116,54	233,08
Си	0,96	1,93	3,86	7,72	15,43	30,87	61,74	123,47	246,94

Имеются данные о положительном воздействии музыки на пожилых, страдающих психическими расстройствами людей. Авторы [16, 17] отмечают, что воздействие внешних волновых процессов способно изменить функциональную активность психологических процессов головного мозга – волны мозговой активности: beta-ритм (14-30 Гц) –состояние бодрствования, alpha-ритм (7-14 Гц) – состояние пробуждения, theta-ритм (4-7 Гц) – состояние сна и delta-ритм (0,5 – 4 Гц) – глубокий сон, транс, гипнотическое состояние. Коррекция нарушения ритмов головного мозга при помощи аудио программы бинауральных ритмов с частотами электроэнцефалографии способствует улучшению мозговой активности пациентов.

По стандартам Международной классификации болезней 9-го пересмотра (ICD-9-CM), музыкотерапия классифицируется как лечебная процедура под кодом 93.84. Эффекты музыки изучаются с разных сторон, начиная от снижения уровня стресса у пациентов с различными заболеваниями и заканчивая ее биохимическим эффектом на организм. Музыка модулирует активность клеток-киллеров и цитокининов. Данные эффекты могут варьировать в зависимости от типа музыки (быстрая/медленная музыка, перкуссия т. д.).

Необходимо отметить, что идея музыкальной терапии принадлежала еще Пифагору. Он использовал сочиненные им мелодии для лечения «болезней души», и классифицировал мелодии, применявшиеся для лечения по болезням. Имел для каждого заболевания собственный музыкальный рецепт. К сожалению, ни классификация, ни сами мелодии до нас не дошли [18].

В современной экологии и санитарии октавные частотные характеристики используются при нормировании шумовой нагрузки, установлении порога сенсорного восприятия звуковых волн и определении ущерба, нанесенного здоровью человека, работающего в условиях стационарного шумового давления. Таким образом, тонический октавный анализ является базовым при определении качественных и количественных характеристик шума.

Ультразвуковой диапазон акустических волн также может оказывать как терапевтический эффект, ускоряя регенерацию тканей, снимая воспаление и боль, так и нежелательные последствия, особенно при неправильном использовании или длительном воздействии промышленных или бытовых приборов. В медицинских диагностических аппаратах интенсивность ультразвука тщательно контролируется, чтобы минимизировать риски для пациентов. Ультразвуковые волны с частотой от нескольких единиц до нескольких десятков МГц используются для исследования мягких тканей, волны с частотой 100 МГц используются для исследования кожи и глаз, а волны с более низкими частотами (от 750 кГц до 3 МГц) применяются в физиотерапии. Ультразвук также применяют в лечении нейродегенеративных заболеваний [19], при блокаде нервов [20]. Ультразвук снимает болевой синдром и уменьшает воспалительные процессы, ускоряет заживление ран, восстановление тканей, рубцов и нервов, расширяет сосуды и активирует кровоток на клеточном уровне, снимает спазмы, нормализует обмен веществ, способствует омоложению кожи, разглаживанию морщин и улучшению состояния волос.

Однако волны ультразвукового диапазона (10 – 20 кГц) в сочетании с интенсивным шумом оказывают негативное воздействие на организм человека, вызывая утомление, головную боль, нарушение циркадных ритмов, раздражительность и снижение кровяного давления. Чрезмерное воздействие акустических волн ультразвукового диапазона может вызвать снижение биопотенциалов коры головного мозга. Продлив октавный ряд слышимого диапазона до второй октавы ультразвукового диапазона, можно объяснить негативное воздействие ультразвукового диапазона нарушением кратности частот модулированного ультразвука и модулирующего (базового) инфразвука (таблица 3).

Таблица 3. Кратные частоты слышимого и ультразвукового диапазона фундаментальным частотам инфразвукового диапазона

Звук, νГц	Инфра	Слышимый					Ультра	
Октава	V (δ)	I	II	III	IV	V	I	II
До	0,51	261,63	523,26	1046,52	2093,04	4186,08	8372,16	16744,32
До #	0,54	277,18	554,36	1108,72	2217,44	4434,88	8869,76	17739,52
Ре	0,57	293,66	587,32	1174,64	2349,28	4698,56	9397,12	18794,24
Ре #	0,61	311,13	622,26	1244,52	2489,04	4978,08	9956,16	19912,32
Ми	0,65	329,63	659,26	1318,52	2637,04	5274,08	10548,16	21096,32
Фа	0,68	349,23	698,46	1396,92	2793,84	5587,68	11175,36	22350,72
Фа #	0,72	369,99	739,98	1479,96	2959,92	5919,84	11839,68	23679,36
Соль	0,77	392,00	784,00	1568,00	3136,00	6272,00	12544,00	25088,00
Соль #	0,81	415,30	830,60	1661,20	3322,40	6644,80	13289,60	26579,20
Ля	0,85	440,00	880,00	1760,00	3520,00	7040,00	14080,00	28160,00
Ля #	0,91	466,16	932,32	1864,64	3729,28	7458,56	14917,12	29834,24
Си	0,96	493,88	987,76	1975,52	3951,04	7902,08	15804,16	31608,32

Представленные выше данные свидетельствуют о том, что с увеличением частоты акустического колебания уменьшаются фрактальные данные объекта – мишени.

Многие органы человека – не что иное, как своеобразные резонансные контуры, настроенные на определенные частоты (таблица 4). Если частоты инфразвукового диапазона влияют на работу органов и систем организма, то ультразвуковой и гиперзвуковой диапазон влияют на клеточный и субклеточный уровень организации живой материи.

Учитывая тот факт, что источниками техногенного шума зачастую является электробытовая техника целесообразно рассмотреть кумулятивный эффект от электромагнитного и акустического воздействия. В первую очередь обращает на себя внимание тот факт, что частота является определяющим фактором в выборе органа – мишени, как для акустической волны, так и для электромагнитной волны.

Таблица 4. Собственные частоты органов и органелл человека (Гц)

Биологический объект	Собственная частота	Звуковой диапазон	Электромагнитный диапазон
Нуклеосома	$4,50*10^{15}$	Гиперзвуки 10^{11} <<<	7, $5*10^{14}$- $3*10^{16}$ - УФД, $4,3*10^{14}$-$7,5*10^{14}$ - ВД
Рибосома	$2,65*10^{15}$		
Митохондрии клеток печени	$3,18*10^{13}$		$3,0*10^{11}$-$4,3*10^{14}$ ИКД
Геном клетки человека	$2,50*10^{13}$		
Хромосома метафазная	$1,5*10^{13}$		
Соматические клетки	$2,39*10^{12}$		
Ядра соматических клеток	$9,55*10^{12}$		
Хромосома интерфазная	$7,50*10^{11}$		
Цитоскелет	$1,00*10^{11}$		
Клеточные мембраны	$5,00*10^{10}$	Ультразвуки $2*10^4$ – $1*10^{10}$	$3,0*10^{11}$- $3,0*10^7$ – ИКД- КВД (радиоволны)
ДНК	$2*10^9$-$9*10^9$		
Глаза	40 -100	Слышимые звуки 16 -$2*10^4$	$3,0*10^7$- $3*10^5$СВ $3*10^5$ – $3*10^4$ДВ $3*10^4$>>> СДВ (радиоволны)
Голова	20 - 30		
Вестибулярный аппарат	0,5 - 13	Инфразвуки 0,5-16	
Почки	6 - 8		
Сердце	4 - 6		
Руки	2 - 5		
Кишечник	2 - 4		
Грудная клетка и брюшная полость	3 - 3,5		
Желудок	2 - 3		

Имеются экспериментальные исследования по направленной дифференциации плюрипотентных стволовых клеток (недифференцированных клеток, способных развиться в дифференцированные клетки разного типа) при воздействии электромагнитных полей. Использовали воздействие на биообъекты радиации ультрафиолетового (λ=290–390 нм), видимого (λ=390–760 нм) и инфракрасного (λ=760–1500 нм) диапазона. Эти излучения вызывали резонансные отклики микроструктур живого организма ($2,39*10^{12}$ Гц – соматические клетки; $9,55*10^{12}$ Гц – ядра соматических клеток; $3,18*10^{13}$ Гц – митохондрии клеток печени; $2,5*10^{13}$ Гц – геном клетки человека; $7,5*10^{11}$ Гц – хромосома интерфазная; $1,5*10^{13}$ Гц – хромосома метафазная, $2\text{-}9*10^9$ Гц – ДНК; $4,5*10^{15}$ Гц – нуклеосома; $2,65*10^{15}$ Гц – рибосома; $5\text{-}10^{10}$ Гц – клеточные мембраны; 10^{11} Гц – цитоскелет) [21].

Можно предположить, что и гиперзвуковой диапазон способен инициировать дифференциацию плюрипотентных стволовых клеток в том или ином направлении в такой же степени, как и электромагнитное излучение соответствующей частоты.

К аналогичным выводам пришли ученые Харьковского института радиофизики и электроники изучавших комбинированное воздействие электромагнитных и акустических волн на микроводорослях *Chlamydomonas reinhardtii* Dang. и *Chlorella vulgaris* Bejer. с целью выявления резонансных частот. Было установлено, что область резонансных частот для суспензии водорослей лежит в ЭМ мм-диапазоне с амплитудной модуляцией f= 1900-2900 Гц, для акустических волн – f=2000-3000 Гц. Таким образом, можно констатировать существенное перекрытие частотных диапазонов для акустических волн и модулированных практически тем же диапазоном частот ЭМИ мм-радиоволн (Диаграмма 2, 3).

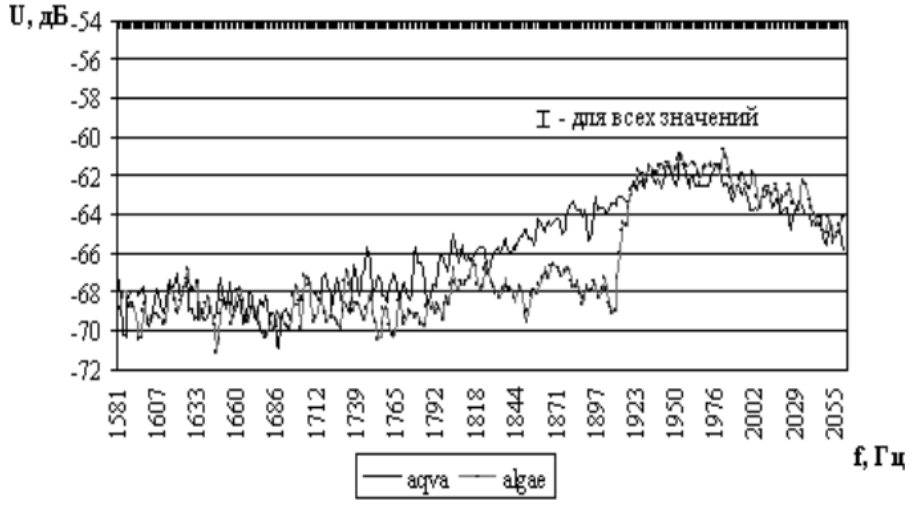


Диаграмма 2. Частотная зависимость акустического воздействия на суспензию микроводорослей (algae) и дистиллированную воду (aqva). По оси ординат – уровень электромагнитного сигнала на частоте 37 ГГц (без модуляции) [22].

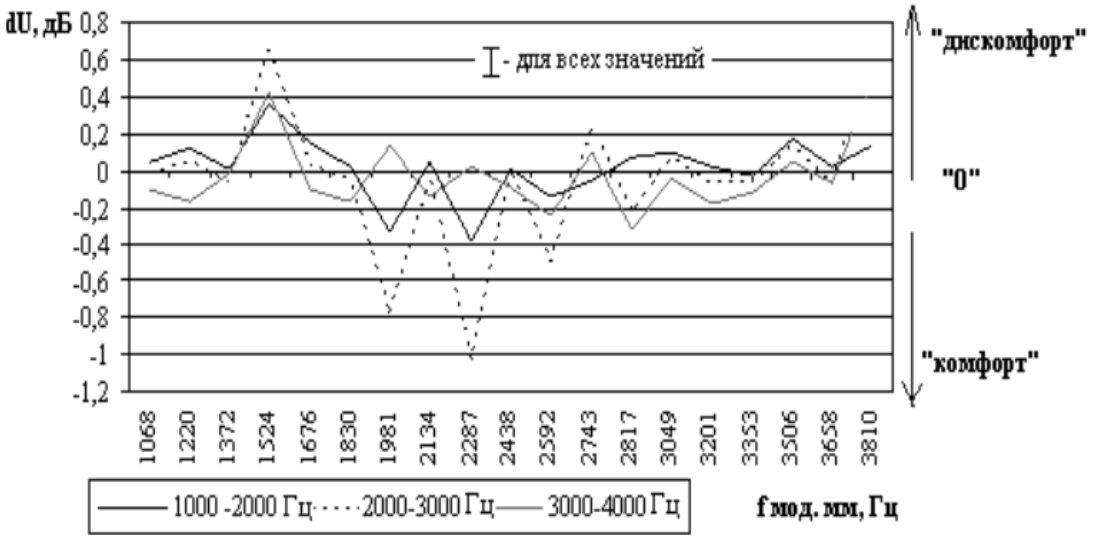


Диаграмма 3. Частотная зависимость комбинированного воздействия ЭМИ мм-диапазона и акустических волн на суспензию микроводорослей. По оси ординат: разность текущего уровня и контрольного безакустического воздействия. По оси абсцисс: частота модуляции ЭМИ мм-диапазона волн. Черная линия – участок «sweep-режима» акустических волн 1000 ÷ 2000 Гц, пунктир – 2000 ÷ 3000Гц, серая линия – 3000 ÷ 4000 Гц [22].

Там же указывалось на достаточно близкое совпадение с исследованиями по стафилококкам, у которых начальная граница резонансных частот составила 4 кГц, которая представляют собой резонанс целой клетки. Далее следующие по спектру частоты, доходящие до единиц мегагерц, связаны с резонансами внутриклеточных структур – это частоты близкие к 10 МГц, которые соответствуют частотам, возникающим при преобразовании электромагнитной энергии в акустоэлектрический резонанс липидного бислоя мембраны. Таким образом, общее поле спектрального воздействия на клетки размера от 1 мкм до 7 мкм находится в пределах единиц килогерц и долей и единиц мегагерц для внутриклеточных структур [22].

Явления перекрытия частотных диапазонов для акустических и электромагнитных волн можно объяснить тем, что собственные резонансные частоты биологических систем определяются их метрическими характеристиками, а в качестве триггера резонансных явлений может выступать любой фактор, чьи частотные характеристики совпадают с собственными частотными характеристиками биологической системы.

Важно учитывать, что при резонансе сложных нелинейных систем (к которым относятся биообъекты) частота воздействия и частоты отклика не обязательно совпадают. Однако резонансный отклик организма возможен на одних и тех же частотах при различных типах воздействия, что важно учитывать при оценке рисков ухудшения качества жизни в зонах повышенного шумового прессинга.

3.3. Качественные характеристики звуковых колебаний

Описание качественных характеристик акустической волны сопряжено непосредственно с восприятием звука специфическим органом – слуховым аппаратом человека. Качественные параметры звуковой волны зависят как от строения источника звука, так и от органа его восприятия. Так, тембр звука зависит от субъективных параметров источника звука: длины голосовых связок, толщины струны, а тон зависит от сочетания звуков. Сложный тон можно представить в виде суммы простых тонов (разложить на составляющие тона). Наименьшая частота такого разложения соответствует основному тону, а остальные – обертонам, или гармоникам. Как ранее отмечалось, обертоны имеют частоты, кратные основной частоте. Акустический спектр тона – это совокупность всех его частот с указанием их относительных интенсивностей или амплитуд. Несмотря на то, что интенсивность и амплитуда являются количественными характеристиками звука их воздействие на организм человека, определяет качественная характеристика – громкость. Именно громкость позволяет субъективно делить звуки на громкие и тихие. Основная физическая величина, обуславливающая интенсивность, амплитуду и громкость звука – это давление звуковой волны (таблица 5).

Таблица 5. Источники, громкость (дБ) и давление (Па) акустических волн

Источники	Громкость, дБ	Давление, Па
Порог слышимости	0	$20*10^{-5}$
Шелест листвы и слабого ветра	10-20	$6*10^{-5}$- $2*10^{-4}$
Тихий шепот	20-30	$2*10^{-4}$- $6*10^{-4}$
Громкий разговор	60-70	$2*10^{-2}$- $6*10^{-2}$
Шумная улица	70-80	$6*10^{-2}$ - $2*10^{-1}$
Двигатель грузового автомобиля	80-90	$2*10^{-1}$
Отбойный молоток	90-100	$6*10^{-1}$
Рок – концерт, самолет на взлете	120	20
Болевой порог	130	60
Контузия	135	110
Шок, травмы, разрыв легких	160	$2*10^{3}$
Смерть	200	$2*10^{5}$

Громкость звука измеряется в децибелах (дБ) и рассчитывается по формуле уровня интенсивности звука:

$$L_I = 10 \cdot \lg (I/I_0) \qquad (3)$$

Где I – интенсивность звука, I_0— пороговая интенсивность звука (10^{-12}Вт/м^2).

Связь интенсивности звука и звукового давления выражается формулой:

$$I = (p^2)t/Zs \qquad (4)$$

где I – интенсивность звука, Вт/м²; p – звуковое давление, Па; Zs – удельное акустическое сопротивление среды; <>t – усреднение по времени. Связь звукового давления и амплитуды звукового давления выражается через формулу:

$$p = p_0 \sin(\omega t + \varphi) \qquad (5)$$

где p_0—амплитуда звукового давления.

Уровень звукового давления Lp – измеренное в логарифмических единицах значение звукового давления, отнесенное к пороговому давлению равному 20мкПа и соответствующему порогу слышимости синусоидальной звуковой волны частотой 1 кГц.

$$Lp=20 \lg p/20\text{мкПа} \quad \text{дБ} \qquad (6)$$

Порог слышимости – величина субъективная, поэтому громкость звука характеристика качественная. Громкость звука, воспринимаемая человеческим ухом, зависит от частоты звуковых колебаний, но не линейно: при одинаковом звуковом давлении, низкие и высокие частоты кажутся менее громкими, чем средние частоты. В области низких и высоких частот слух менее чувствителен, и для достижения той же субъективной громкости, что и на частоте 1000 Гц, требуется более высокое звуковое давление. Область наилучшей слышимости человека лежит в интервале от 1000 Гц до 5000 Гц (от До I октавы до Ми V октавы, диаграмма1, таблица 3).

Из-за того, что человеческое ухо по-разному воспринимает звуки, имеющие одинаковый уровень звукового давления при разной частоте колебаний, акустическую волну приходится моделировать с помощью специальных частотных фильтров, измеряя так называемый взвешенный уровень звука. Полученная в результате измерений величина имеет размерность дБ А (буква А означает, что взвешенный уровень звука получен с использованием частотного фильтра типа А). По принципу устройства ухо работает как микрофон: звуковые волны заставляют вибрировать тонкую мембрану, которая, в свою очередь, посредством косточек среднего уха возбуждает колебания жидкости в улитке, где механические колебания жидкости преобразуются в электрические импульсы, которые мозг интерпретирует как звуки определенной громкости и частоты. Но далеко не все аспекты обработки внешних сигналом нам известны. Одной из таких тайн является механизм локализации источника звуков. Очевидно, что способность человека ощущать интерауральную разницу во времени может варьировать в зависимости от интенсивности звука. Однако ученые заявляют, что достаточно сложно интерпретировать выводы, связывающие чувствительность к интерауральной разнице и оценку слушателем направления источника звука как функции интенсивности звука. Теоретические предположения и подтверждающие их практические опыты показали, что нейроны головного мозга у млекопитающих активируются с разной скоростью в зависимости от направления звукового сигнала. Следом мозг сравнивает эти скорости между всеми задействованными в процессе нейронами для динамического построения карты звуковой среды [23].

Выводы

1. Акустические (механические) колебания представляют собой универсальный физический фактор, воздействующий на живые системы всех уровней организации — от субклеточного до организменного. Их биологическое действие определяется сочетанием параметров частоты, амплитуды, длины волны, продолжительности воздействия и среды распространения.

2. Физиологический эффект акустических волн является двояким: при превышении интенсивности звукового давления возникает стрессорное воздействие (нарушения гомеостаза, функциональные расстройства слухового и нервного аппарата), тогда как при умеренной интенсивности наблюдаются адаптационные и восстановительные эффекты, включая улучшение микроциркуляции, активацию парасимпатической системы и оптимизацию психоэмоционального состояния.

3. В ходе исследования было выявлено, что человеческий слуховой аппарат оптимизирован для восприятия диапазона частот, совпадающего с диапазоном человеческого голоса, что свидетельствует о коэволюционном развитии речевых и слуховых функций.

4. Установлена связь между воспринимаемыми звуковыми частотами и биоритмами головного мозга: если частота воспринимаемого звукового сигнала совпадает или кратна одному из внутренних ритмов мозга (β-, α-, θ-, δ-диапазонам), происходит резонансное возбуждение соответствующих нейронных центров с характерными физиологическими реакциями; некратные частоты, напротив, вызывают «смещённое возбуждение», то есть интерференционные (шумовые) эффекты в коре головного мозга.

5. Ультразвуковые и инфразвуковые диапазоны обладают выраженным биологическим действием, выходящим за пределы сенсорного восприятия. Ультразвук способен вызывать клеточные микровибрации, усиливать транспорт веществ через мембраны и активировать регенерационные процессы, тогда как инфразвук может влиять на эмоционально-когнитивные функции и ритмику мозговой активности.

Библиография:

1. РОМАНОВ, С. Н. *Биологическое действие вибрации и звука: Парадоксы и проблемы XX века*. Л.: Наука, 1991. 158 с.
2. DARWIN CH. Visited During the Voyage of H.M.S. Beagle Round the World. В: *Journal of Researches into the Natural History and Geology of the Countries.* 1834. pp. 169–170.
3. SIMPSON G. G. *Tempo and mode in evolution.* New-York: Columbia University Press. 1944. 264 с.
4. RAUP, D. M., SEPKOSKI, J. JR. Mass extinctions in the marine fossil record. В: *Science*. T. 215,№. 4539.V. 215. 1982. С. 1501ю.–ю1503. doi:10.1126/science.215.4539.1501
5. DAVID P. G. BOND, STEPHEN E. GRASBY. On the causes of mass extinctions B: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. V. 478. 2017. p. 3-29. doi:10.1016/j.palaeo.2016.11.005
6. БАЗАРОВ И. П. *Термодинамика.* М.: Высшая школа, 1991. С. 133. Архивировано 7 октября 2013 года.
7. WHO: Uptake and impact of the WHO Environmental noise guidelines for the European Region: experiences from Member States Basel, Switzerland, October 10, 2018. https://www.who.int/europe/news/item/10-10-2018-new-who-noise-guidelines-for-europe-released
8. КРАВЧЕНКО, Ю. Модель фильтра знаний для задач семантической идентификации. В: *Известия ЮФУ. Технические науки.* № 4. 2018. с. 197-211
9. DEDIU, I. *Enciclopedia Ecologiei*. Chișină „Știinta”, 2019. 563 с.
10. ДАНИЛОВ, А. Б., СИМЕНКО, Е. В., ИХЛЕФ, А. Влияние звука на здоровье и реабилитацию. В: *Физическая реабилитационная медицина, медицинская реабилитация.* 4(2). 2022. с. 105-110. DOI: https://doi.org/10.36425/rehab46494
11. БУРЦЕВ Н. Н.: О частотах нот полного звукоряда, 23 июня, 2012. https://www.oberton.pro/forum/topic/1710
12. GOODMAN, S. *Sonic Warfare: Sound, Affect, and the Ecology of Fear*. The MIT Press 2012. p. 270. DOI:10.7551/mitpress/7999.001.0001 ISBN: 9780262258838.
13. WEICHENBERGER, M., HENSEL, J., KUHLER, R., BAUER, M. Brief bursts of infrasound may improve cognitive function – An fMRI study. *Hear Res*. 2015. p. 87-93. doi: 10.1016/j.heares.2015.08.001.
14. AUDIOMASTER: *The online redactor audio.* https://audiomaster.su/tembr.php
15. PERETZ, I., VUVAN, D. T. Prevalence of congenital amusia. *European Journal of Human Genetics* V. 25. 2017. p. 625–630 https://doi.org/10.1038/ejhg.2017.15
16. МЕНЬШИКОВА, Е.В., РУБАНОВА, Д.В., ТЕРТИЧНАЯ, А.Н., ДЕГТЯРЕВ, В.П. Влияние музыкальных ритмов на активность структур головного мозга. *Сборник тезисов и статей Здоровье и образование в XXI веке*. Т12. 2010. с. 266
17. КУНАВИН, М. А., СОКОЛОВА, Л. В. Спектральные характеристики биоэлектрической активности мозга студентов при прослушивании аудиостимулов различного компонентно-структурного состава. *Экология человека* №3, 2014. С. 34-41.
18. ПЕЛЬТЦЕР, А. К. Кто ты, Пифагор? М: *Знание – сила*. №3. 1995 с.20-28
19. ДЖАФАРОВА, М. Ю., *ДЖАФАРОВ*, *В. М., СЕНЬКО*, *И. В.*, *БЕЛОУСОВ*, *В. В.* Применение фокусированного ультразвука под контролем магнитно-резонансной томографии для лечения тремора при болезни Паркинсона. В: *Российский неврологический журнал*. 27(6):2022. с. 56-62. https://doi.org/10.30629/2658-7947-2022-27-6-56-62
20. LEWIS, SR, PRICE, A, WALKER, KJ, MCGRATTAN, K, SMITH, AF. Ultrasound guidance for upper and lower limb blocks. *Cochrane Database of Systematic Reviews* Issue 9. 2015. DOI: 10.1002/14651858.CD006459.pub3

21. ХАДАРЦЕВ, А. А., ЕСЬКОВ, В. М., ХАДАРЦЕВ, В. А. , ИВАНОВ, Д. В. Клеточные технологии с позициг синергетики. *Вестник новых медицинских технологий Раздел I. Биология сложных систем. Физико-биологическое и математическое моделирование функционирования органов и систем человека* Т. XVI, № 4. 2009. с.7.
22. КОЛЕСНИКОВ, В. Г., ДРЕВАЛЬ,, Н. В. Применение комбинированного воздействия электромагнитных и акустических волн на микроводоросли для выявления резонансных частот. Физика живого, Т. 18, No 3, 2010. с. 24-28].
23. СОКОЛОВ, Е. Н. Очерки по психофизиологии сознания, часть I. Сферическая модель когнитивных процессов, глава 2. От карты детекторов – к Карте памяти и карте семантических единиц. *Вестник Моск. Ун-та. Психология*. Сер. 14. № 3. 2009. с. 3-2.

Данные об авторе:
Ирина КОЛОМИЕЦ, доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории Экоурбанистики, института Экологии и Географии, Молдавский государственный университет.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2144-7667
E-mail: irina.kolomiet@sti.usm.md

Prezentat: 01.10.2025