

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
Серия «ОТ МОЛЕКУЛЫ ДО ОРГАНИЗМА»  
Основана в 1981 году

С. Н. РОМАНОВ

**БИОЛОГИЧЕСКОЕ  
ДЕЙСТВИЕ  
ВИБРАЦИИ  
И ЗВУКА**

**Парадоксы и проблемы XX века**

Под редакцией  
доктора биологических наук  
И. А. ВАРТАНЯН



Ленинград  
«НАУКА»  
Ленинградское отделение  
1991

УДК 612.014.45+613.164

**Романов С. Н.** Биологическое действие вибрации и звука: Парадоксы и проблемы XX века. — Л.: Наука, 1991. — 158 с. — (От молекулы до организма).

Книга посвящена одной из актуальных медико-биологических проблем. Рассматривается характер биологического действия механических факторов на живые системы. Обсуждаются различные аспекты вибрационной и шумовой болезней, появившихся в результате нарушения биологически необходимых, оптимальных уровней интенсивностей действия звука и вибрации. Анализируются пути борьбы с повреждающим действием вибрации и звука, а также вопросы использования этих механических факторов в лечебной практике.

Рецензенты: *Ю. Л. ГОГОЛИЦЫН, Э. И. СЛЕПЯН*

Редактор издательства *К. А. ЛАНГЕ*

Р  $\frac{1502020000-541}{054(02)-91}$  87-90 Н ПЛ

© Издательство «Наука», 1991

ISBN 5-02-025790-7

Светлой памяти  
дорогого брата Михаила Никитича  
и его сына Петра Михайловича,  
погибших на фронтах  
Великой Отечественной войны

## ВВЕДЕНИЕ

---

В подзаголовке книги стоят слова: «Парадоксы и проблемы XX века». Этим нам хотелось подчеркнуть, во-первых, что речь идет о проблемах действительно кажущихся парадоксальными и, во-вторых, что эти проблемы стали остро ощутимыми в наш просвещенный XX век. Вопрос касается глобальной проблемы *Человек и окружающая его среда*. Основным физическим компонентом среды, окружающей человека, который будет предметом обсуждения, является механическое колебание — вибрация и звук. Оба этих явления имеют одну и ту же физическую природу. В силу упругих свойств среды — жидкой, твердой, газообразной — механические колебания распространяются волнообразно. Скорее, условно, чем в силу каких-либо физических особенностей, под звуком понимается распространение механических колебаний определенной частоты и интенсивности в воздухе. Известно, однако, что звук, вызванный в толще воды и твердых телах, распространяется также волнообразно во все стороны, и благодаря большей плотности, чем плотность воздуха, скорость распространения его в воде примерно в 4 раза выше. С еще большей скоростью колебания распространяются в толще земли (сейсмические колебания), в твердых телах.

Термин *вибрация* мы чаще всего употребляем для обозначения механического колебания самого объекта

(субстрата) и среды, его окружающей. Эти извне навязанные колебания в силу упругих свойств предмета также распространяются волнообразно. Например, вибродатчик, приложенный к любой части тела животного, вызывает колебания, которые распространяются по всему организму. Вибрация и звук характеризуются переменным давлением. Однако интенсивность и характер этого давления различны. При вибрации, как правило, давление имеет вектор, совпадающий с вектором гравитации (вертикальная вибрация), либо под определенным углом к этому вектору. Эта физическая особенность вибрации имеет исключительно важное значение как в технике, так и в биологии. Как известно, в технике нередки случаи аварийных ситуаций в результате вынужденных вибраций, по частоте совпадающих с собственной частотой колебаний данной структуры (конструкции). Биологи, вернее сказать — медики, также стали обнаруживать своеобразные «аварийные» ситуации у человека, подвергавшегося воздействию вибрации. Несомненно, что в обоих случаях причины одни и те же. Об особенностях биологического действия звука и вибрации нами уже говорилось (Романов, 1983). Здесь мы употребляем оба эти понятия, скорее, как обозначение энергии механического колебания, не уточняя их физической характеристики и их специфического действия на биологические объекты.

Механическая энергия в виде вибрации и звука является неотъемлемым свойством физического мира, это постоянный и необходимый спутник жизни, развивающейся на нашей планете. Кроме собственной энергии механических колебаний, которой обладали элементы зарождающейся жизни в силу своей физической природы, живая материя развивалась в условиях постоянного действия механических колебаний окружающего мира. Этот внешний фактор участвовал в формировании биологических: морфологических и функциональных, структур. В процессе многовековой эволюции создалась удивительная гармония живых существ с окружающим их миром звуков, миром различных форм энергии механических колебаний. Венцом этой гармонии является духовный мир человека, мир музыки, мир, который приобрел неизмеримую власть над ним. Описание биологической роли звука и вибрации в жизни

животных и человека является содержанием первой главы.

И вот в эту гармонию вторгся человек XX в. с его научно-технической революцией (НТР). Возникла дисгармония между жизнедеятельностью организмов и внешними механическими колебаниями. В биосоциальном мире появился один из фундаментальных парадоксов: жизненно необходимые факторы среды — звук и вибрация — становятся источником патологии, угрожая биологическому благополучию человека. Патологическое действие звука и вибрации в высшей степени разнообразно не только в медико-биологическом, но и в социальном аспекте. Появились две новые нозологические единицы болезней — вибрационная и шумовая. Социальный аспект заключается еще и в том, что из всех профессиональных заболеваний названные болезни занимают первое место, нанося людям, кроме физических страданий весьма серьезный экономический ущерб. Эта дисгармония между биологическими процессами и действием механических колебаний типа звука и вибрации породила проблему, ставшую частью глобальной проблемы *человек и среда, его окружающая*. Биологическая опасность патологического действия звука и вибрации заключается прежде всего в возможности нарушения генома. Отдаленные последствия этого действия несомненно могут определять биологическую судьбу человека.

Разумеется, в этой общей биологической проблеме имеются проблемы более частные, последствия которых ощутимы уже теперь, и в еще большей мере они будут сказываться в обозримом будущем. Вопросы, касающиеся характера патологических процессов, возникающих в результате действия звука и вибрации, и механизм их возникновения являются основным содержанием второй главы.

Вслед за этим встает логически неизбежный вопрос: если эволюционно созданная гармония человека и животных с окружающей средой нарушена, если биологические последствия этого нарушения становятся все более очевидными, то какова задача ученых и какова должна быть задача человека в борьбе с возникшей дисгармонией? На каких биологических и социальных законах должна основываться эта борьба? Это — центральная задача предлагаемой книги — показать воз-

возможные пути решения проблемы, связанной с биологической ролью звука и вибрации. Этому посвящена третья глава.

Таковы историческая последовательность возникновения проблемы и последовательность ее анализа.

Книга заканчивается несколько тревожным вопросом — есть ли у человека возможности решения этой глобальной, биосоциальной проблемы в свою пользу и для своего блага? Сумеет ли он направить свой могучий интеллект на создание истинной гармонии с окружающей средой? Сумеет ли человек, поняв законы природы, которые мстят ему за его невежество, сделать их своими союзниками?

# Глава 1. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЖИВОТНЫХ К ВИБРАЦИИ И ЗВУКУ. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ЭТИХ КОЛЕБАНИЙ

---

Наличие атмосферы и гидросферы на нашей планете является уникальным условием возникновения бесконечного разнообразия и по форме, и по интенсивности механических колебаний. Звук, слышимый человеком, составляет лишь малую область частотного спектра механических колебаний (рис. 1). В условиях этих, природой заданных колебаний зарождалась, развивалась, становилась такой, какой теперь видит человек, жизнь на Земле. И сам он, человек, прошел эту долгую историю становления в условиях постоянного действия всех физических факторов среды, его окружающей, в том числе механических колебаний. Естественно, возникает вопрос: в каких отношениях находятся эти два явления природы — жизнь и механические колебания? Является ли живая материя инертной к звуковым, как и к любым другим механическим, колебаниям? В содержании этого вопроса нельзя не видеть по крайней мере две фундаментальные проблемы биологии: проблему единства живой материи со средой, ее окружающей, и проблему роли механических колебаний в жизни животных и человека на различных этапах их эволюции.

Постулат о единстве мира господствует в науке с древнейших времен. Теперь уже речь идет о конкретном содержании этого единства, которое можно представить в виде реальных процессов в измеримых отрезках пространства и времени. Человек все больше и лучше начинает понимать, что жизнь — явление космическое. Эта связь земной жизни с космосом получила экспериментальное подтверждение в трудах нашего соотечественника К. А. Тимирязева. Мы — дети Солнца. Солнце—хлорофилл—жизнь — вот цепь, связующая

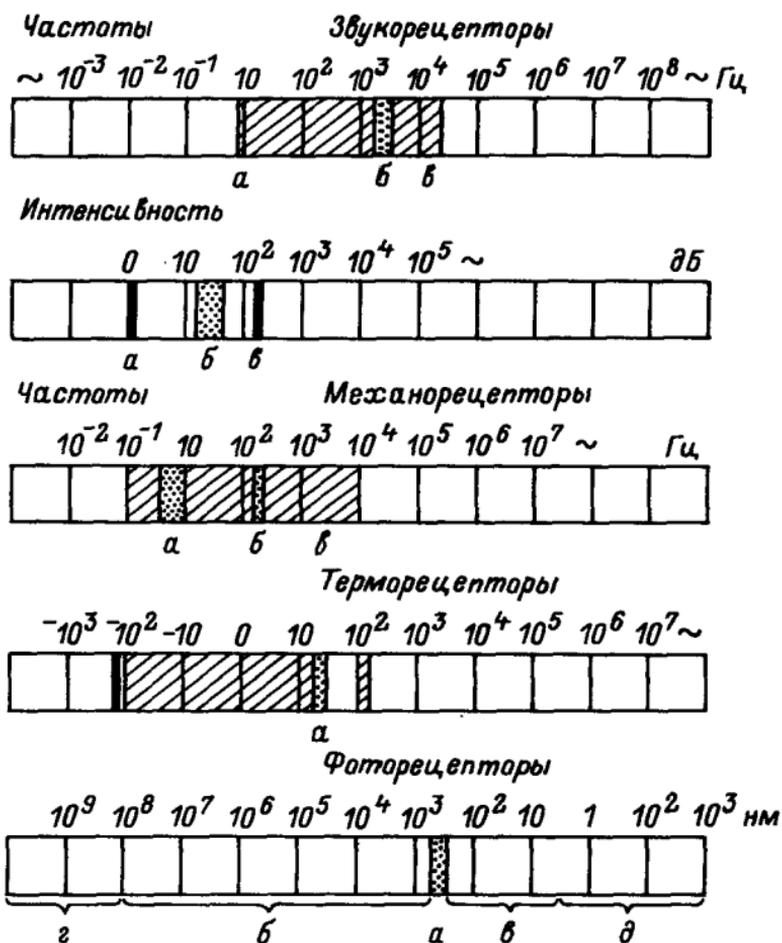


Рис. 1. Участки спектров различных видов энергии, воспринимаемых рецепторами человека.

**Звукорецепторы.** Частоты: а—в границы чувствительности, б — оптимум по частоте; интенсивность: а — граница чувствительности; б — оптимум по интенсивности; в — граница переносимости.  
**Механорецепторы** (частоты, Гц): а — наиболее эффективные частоты, резонансные для органов и организма человека; б — резонансные частоты для белка, клеток; в — приближительный спектр частот, воспринимаемый механорецепторами.  
**Терморецепторы:** а — оптимум; б — инфракрасные лучи; в — ультрафиолетовые лучи; з — радиоволны; д — лучи Рентгена.

земное с космическим. В сущности и механические факторы, которые нас здесь интересуют, также не являются специфически земными. Все виды проявления механической энергии (гравитация, давление, колебания) — суть явления космического порядка, как и другие физические факторы, например свет, теплота, радиация. К сожалению, мы пока мало знаем о доле

участия каждого из этих факторов в формировании жизни на Земле, об их биологической роли на протяжении всей предшествующей эволюции. По этому поводу мы можем привести прекрасную мысль великого русского физиолога И. М. Сеченова о том, что внешняя среда должна входить составной частью в понятие жизнь. Вопрос о связи живой материи с механическими колебаниями приобретает характер глобальной проблемы в биологии — жизнь и внешняя среда. Какую долю участия звук и вибрация приобретают (принимают) в формировании и развитии жизни на Земле? Почему в бесконечном по частоте и интенсивности спектре звука и вибрации оптимальным для живой материи является лишь ничтожно малый его участок (см. рис. 1). Этот вопрос — основной, и мы, в пределах своей компетенции, будем его обсуждать в разных аспектах на протяжении всей книги.

В первой главе приводятся данные о чувствительности животных различного уровня эволюционного развития к звуку и вибрации. Обсуждается природа этой чувствительности. Далее по ходу обсуждения ставится вопрос о необходимости различать первичную и вторичную роль механических колебаний в жизни животных и человека. Выдвигается тезис, что первичная роль механических колебаний связана с формированием биологических структур, с непосредственным их участием в биологических (метаболических) процессах; вторичная роль связана с обеспечением особи необходимыми условиями в борьбе за существование. Эта роль имеет экологическое, популяционное значение.

Говоря о чувствительности животных различных таксономических групп к вибрациям и звуку, следует подчеркнуть, что, когда речь идет о чувствительности особи к механическим колебаниям, имеется в виду чувствительность механорецепторов. Действие механических раздражителей на неречепторные клетки и ткани, тем более в сравнительном аспекте, насколько нам известно, никогда не было предметом исследований. Такой проблемы, к сожалению, нет и теперь. Внимание биологов (зоологов) концентрировалось на изучении механочувствительности ведущих систем организма: органов чувств, пищеварения, органов движения, репродукции, изучалась их эволюция. Какова эволюционная судьба клеток этих ведущих систем? Есть ли

различие в чувствительности к механическим колебаниям нервных, мышечных и любых других клеток животных самых отдаленных друг от друга таксонов, например насекомых и млекопитающих? Этого мы не знаем. Между тем, прежде чем в эволюции появились высокочувствительные рецепторы к различным видам энергии, все клетки, конечно же, обладали определенной чувствительностью к этому виду энергии. Меняется ли эта чувствительность в процессе эволюции, — мы также не знаем. Следовательно, о биологическом значении звука и вибрации в жизни человека мы можем судить лишь по степени чувствительности механорецепторного аппарата, по степени его сложности. Но и здесь также следует оговориться: эволюция любых структур и функций идет не прямолинейно, постепенно усложняясь в процессе эволюции. В основном структура механорецепторного аппарата и его чувствительность определяются экологическими факторами. Это значит, что в их эволюции возможны самые различные пути не только развития, но и утраты ранее созданных структур.

Мы не ставим своей задачей проследить пути развития механорецепторов. Нам хотелось бы показать на ряде примеров, как в различных физических средах: на суше, в воде, в воздухе, звуки и вибрация проявляли свое биологическое действие, какова чувствительность особи к их действию? Это, как мы полагаем, даст возможность оценить биологическую значимость звука и вибрации как факторов внешней среды.

Перед тем как перейти к описанию чувствительности к звуку и вибрации животных, имеющих специальный рецепторный аппарат, мы сочли целесообразным кратко рассмотреть данные о чувствительности к этому физическому фактору биологических структур, не имеющих механорецепторов (вирусов, бактерий и их фагов), а также сведения о чувствительности простейших.

## **ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ВИБРАЦИИ И ЗВУКУ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, НЕ ИМЕЮЩИХ МЕХАНОРЕЦЕПТОРОВ**

### **Вирусы, бактерии и их фаги**

Вероятно, английские ученые Т. Адереен, Б. Винтере, Ш. Богге были первыми, начавшими еще в 40-х годах исследовать чувствительность бактерий и их фагов к звуку и вибрации. Было показано, что как сами бактерии, так и их фаги погибали от непрерывной вибрации с частотой 9000 Гц в течение 60 мин. Биологический интерес, однако, заключается не только в том, что бактерии и фаги погибали под действием вибрации, но и в том, что различные фаги, которые различаются между собой размерами и структурой, как и бактерии, обладают разной чувствительностью к действию этого фактора. Так, уже через 10 мин вибрации неповрежденных бактерий остается всего лишь 1 %, а из фагов:  $T_2$  — 0.7 %,  $T_4$  — 0.009 %,  $T_5$  — 0.008 %, тогда как фаги  $T_3$  сохранились неразрушенными 80 %, фаги  $T_7$  — 40 %. С физической точки зрения, эффект действия вибрации при прочих равных условиях зависит от линейных размеров объекта. Для звуковой вибрации существенным является соотношение длины волны колебательной системы с размерами объекта: чем мельче объект, тем меньше должна быть длина волны и, следовательно, тем выше должны быть частоты вибрации. Но, как видно из приведенных данных, это правило не строго соблюдается. Так, по линейным размерам изученная бактериальная клетка приблизительно на два порядка больше, чем фаги, и тем не менее через 5 мин вибрации неразрушенных бактерий остается 18 %, а фагов только 1.8 %.

Сами фаги по размерам не столь резко различаются между собой. Например,  $T_3$  имеет головку диаметром 4500 нм,  $T_4$  — 6000 нм. Тогда как через 10 мин фаги  $T_4$  практически разрушены полностью, а  $T_3$  — приблизительно на 20 %.

Разумеется, из этих наблюдений не следует, что законы механики оказываются нарушенными в случае действия энергии механических колебаний на живые системы. Дело в том, что строгость законов механики

распространяется на физические параметры взаимодействующих систем: количество энергии, масса, упругие свойства, линейный размер объекта, — тогда как чувствительность живого объекта вибрации определяется еще и особенностями биологической структуры. Причем сама чувствительность оценивается не физическими характеристиками, а чаще всего специфическими биологическими. В этой связи следует упомянуть об исследованиях на бактериях гемолитического стрептококка. Было показано, что при действии вибрации их антигенные свойства сохраняются, а при действии других факторов, связанных с разрушением структуры, эти свойства утрачиваются. Интересно, что белок, экстрагированный из вирулентных штаммов, после вибрационного воздействия сохраняет иммунные свойства, т. е. адсорбируется антителами иммунной сыворотки. Из этого следует, что вибрация действует лишь на общую структуру бактериальной клетки, не затрагивая ее белковых компонентов.

Мы должны с самого начала подчеркнуть основную аксиому, от которой будем отправляться и которой будем руководствоваться на протяжении всей книги; звуки и вибрация (механические колебания) имеют своим единственным адресом действия механическую структуру. Только структура (несущая конструкция), гетерогенная по массе и упругим свойствам, является рецептором механических колебаний.

Рассматривая с этой точки зрения результаты многочисленных исследований действия вибрации на бактериальные клетки, нельзя не заметить, что последние отличаются друг от друга, кроме других показателей, также и своей чувствительностью к вибрации, следовательно своей структурной организацией. Как показали опыты, из исследованных четырех видов бактерий наиболее резистентными оказались бактериальные клетки бацилус субтилулус, причем для этого вида бактерий обнаружена резонансная частота 9065 Гц; при смещении частоты вибрации всего лишь на  $\pm 50$  Гц эффект теряется. Скажем здесь еще раз о роли линейных размеров объекта и реакции на вибрацию. Существует довольно распространенное представление, что эффект механических колебаний зависит от определенного соотношения размеров объекта с длиной волны колеблющейся системы таким образом, что чем ближе размер

объекта к размерам длины волны, тем эффект должен быть выше. В самом деле: примем размер клетки кишечной палочки в среднем равным 10 мкм, а при частоте вибрации, равной 9000 Гц, длина волны равна 15 см, т. е. примерно на 3—4 порядка больше, чем бактериальная клетка. Эта разница увеличивается еще примерно на два порядка в случае, если объектом являются вирусы. И действительно, было показано, что вибрация вируса табачной мозаики с частотой 9 кГц приводит к уменьшению двойного лучепреломления в потоке, к уменьшению яркости.

Электронно-микроскопические исследования выявили, что палочки вируса с обычной длиной 270 мкм после вибрации уменьшаются примерно в 2 раза и имеют длины 140 мкм. Очевидно, как полагают авторы, вибрация ломает палочки на две равные субъединицы. Говоря далее об этих исследованиях, следует обратить внимание на специфическое действие данного фактора. Известно, что термическая обработка, которая чаще всего применяется при исследовании вируса табачной мозаики, приводит к образованию нерастворимого белка и к освобождению нуклеиновых кислот, что не всегда желательно экспериментатору. Обработка культуры вируса вибрацией звуковой частоты сохраняет растворимость, т. е. активное состояние белка. Наконец, иммунологические свойства повышаются, увеличивается преципитация антитела на единицу массы антигена. Исследования на вирусах и бактериях с использованием вибрации в качестве одного из методических приемов дают еще ряд ценных сведений, связанных с природой действия самой вибрации. Показано, например, что эффект разрушения клеток бактерий и простейших под влиянием звуковой вибрации с частотами от 0.2 до 20 кГц зависит от частоты, характерной для каждого вида объекта, и, что для нас представляется особенно интересным, максимальный эффект наблюдается в области резонансных частот, которые также являются характерными для каждого вида.

Остановимся теперь на серии исследований, которые лишь косвенно указывают на чувствительность вирусов и бактерий к низкочастотным механическим колебаниям. Эти работы связаны с объектами, побывавшими в космосе. Н. Н. Жуков-Вережников с соавторами исследовал фагопродукцию лизогенных бактерий

кишечной палочки  $K_{12}$ , подвергавшихся действию факторов космического полета на «Востоке-3» и «Востоке-4». Как известно, процесс образования фага наблюдается и спонтанно; известно также, что этот процесс значительно ускоряется под влиянием ионизирующей радиации сравнительно слабыми дозами. Исследования показали, что бактерии, побывавшие в космосе, продуцируют фаги в 4 с лишним раза интенсивнее, чем их контроль, оставшийся на Земле. Замеры радиации показали, что она по крайней мере на порядок ниже той, которая, отдельно взятая, повышает фагопродукцию.

Академик Н. П. Дубинин, наблюдая аналогичную ситуацию при исследовании генетического эффекта действия космического полета на плодовую мушку (дрозофилу), высказал предположение о возможном усилении эффекта радиации на фоне вибрации. При оценке действия космического полета на лизогенные бактерии Н. Н. Жуков-Вережников с соавторами пришли к такому же выводу. Проверочные опыты в наземных условиях показали, что вибрации с частотами от 35 до 700 Гц и ускорением в 10 g усиливают эффект облучения гамма-лучами ( $^{60}\text{Co}$ ) примерно в 2 раза. Аналогичные результаты были получены Н. И. Рыбаковым и В. А. Козловым в экспериментах на лизогенных бактериях. Реакцию бактерий оценивали по величине  $R$  — отношение числа индуцированных фагов к спонтанно возникающим. Судя по приведенным данным, только вибрация с частотами от 20 до 700 Гц даже несколько снижает спонтанное образование фагов, но в сочетании с облучением фагообразование повышается.

При исследованиях культуры HeLa было установлено, что вибрация, в сочетании с другими факторами космического полета, замедляет скорость роста, повышает чувствительность бактерии к последующим воздействиям. Авторы допускают возможность генетического действия всего комплекса факторов космического полета, и в особенности невесомости. Однако глубокого анализа биологического действия фактора невесомости не приводится.

Таким образом, во-первых, механические колебания в диапазоне частот слышимых звуков (до 10 000 Гц) вызывают структурные и функциональные нарушения в вирусах и в бактериальных клетках. Характер этих

нарушений однозначен: дезинтеграция структуры и подавление (угнетение) свойственной данному объекту биологической функции.

Во-вторых, имеется частотная зависимость эффекта вибрации. Различные виды бактерий и их фаги характеризуются различной чувствительностью к одной и той же частоте колебаний. С известным допущением можно сказать, что каждый вид бактерий обладает повышенной чувствительностью только к определенной, характерной для данного вида частоте колебаний.

## Простейшие

К сожалению, этот огромный и разнообразный тип живых существ, лежащий у самых истоков эволюции животного царства, не был до сих пор предметом систематических исследований с точки зрения эволюции механорецепторного аппарата. Между тем протистологи отмечают наличие дифференциальной чувствительности к различным формам механической энергии даже у наиболее примитивных форм простейших, например у амёб. Электронно-микроскопические исследования не дали каких-либо указаний на наличие структурных образований в теле амёбы, воспринимающих механическую энергию. Если амёба и другие виды простейших не обладают неким структурно обособленным механорецепторным аппаратом, то из этого следует вывод, что рецептором является сама живая (может быть белковая!) структура. Формирование этой живой структуры на Земле шло с учетом постоянно действующих механических факторов, с тем чтобы, с одной стороны, создать в процессе эволюции и закрепить в ее конструкции структуру, способную воспринимать этот вид энергии, а с другой — найти конструктивный вариант, обеспечивающий максимальную механическую прочность. Этот начальный отрезок пути эволюции пока изучен недостаточно.

Мы располагаем лишь небольшим объемом собственных экспериментальных данных, полученных на инфузориях, подвергавшихся низкочастотной вибрации. Исследования проведены на культуре, много лет содержащейся в лабораторных условиях. Питательной средой служила среда Лозино-Лозинского. Известно,

что в индивидуальной жизни у инфузорий имеются два биологически важных периода. После отсадки в свежую питательную среду особи начинают усиленно делиться. Этот период называется стадией лагфазы. Она обычно длится 5—6 сут. Вслед за ней наступает так называемая стационарная стадия, когда происходят рост особей и один из важнейших биологических процессов — конъюгация. Большая часть опытов произведена на 4—5-е сут пересадки. Продолжительность вибрации 30 мин, частота от 25 до 4000 Гц, ускорение 5 g. Реакцию особей на вибрацию оценивали по количеству пищеварительных вакуолей, которые образуются за определенный отрезок времени у особей в норме и у подвергавшихся вибрации. Для контраста вакуолей вводилась китайская тушь. Первоначально ставилась сугубо альтернативная задача: выяснить степень чувствительности парамеций к механическим колебаниям. Первые же опыты показали, что степень чувствительности зависит от частоты вибрации. Наибольшая чувствительность оказалась к частоте 1000 Гц. При вибрации с этой частотой фагоцитарная активность подавляется в среднем на 60 %. Обнаружена частота, при которой фагоцитарная активность стимулируется. Такой частотой является 3000 Гц. К сожалению, нам неизвестны суждения зоологов о биологическом или экологическом значении действия механических колебаний того или иного диапазона частот. Мы лишь констатируем наличие чувствительности к вибрации у простейших.

Интересно отметить, что обнаруживается несколько эффективно действующих частот: 25, 300, 500, 1000, 3000 Гц, а, например, к частотам 100, 200, 700, 2000 Гц инфузории не чувствительны! Эти факты наводят на мысль, что особи имеют ряд структур, чувствительных к вибрации разных частот, которые обеспечивают биологически столь важную функцию, как фагоцитоз.

Заслуживает внимания еще одно наблюдение. Речь идет о спонтанной смене фагоцитарной активности в различные стадии индивидуальной жизни особи и изменений при этом чувствительности к вибрации. Максимальное падение фагоцитарной активности наблюдается на 3-и сутки после отсадки. Вибрация в это время, и в особенности на 6-е сутки, максимально подавляет активность. Вероятно, мы встречаемся с фундаменталь-

ным явлением в биологии, так называемым критическим периодом чувствительности к внешним факторам. Природа этого удивительного явления пока не изучена. Проблема, поставленная эмбриологами около 100 лет тому назад, до сих пор остается, к сожалению, не решенной.

Приведенные данные позволяют заключить, что, во-первых, простейшие (парамеции) обладают чувствительностью к механическим колебаниям. Во-вторых, особи обладают рядом структур, каждая из которых чувствительна лишь к определенным частотам вибрации. И, в-третьих, чувствительность к вибрации, кроме прочего, зависит от фазы роста особи. Максимальная чувствительность наблюдается в конце лагфазы. О чувствительности простейших к механическим воздействиям имеется обширная литература.

В исследованиях конца XIX—начала XX вв. чувствительность особей к механическим раздражениям оценивалась по поведению животного и выражалась в терминах тропизма или таксиса: тигматтаксис, реотаксис, геотаксис. Термин тропизм был впервые введен в начале XIX в. Декандром для растений. Он обозначал явление, связанное с направлением роста, положением листа, стебля, корня. Аналогичные явления: направление движения, изменения положения тела наблюдаются и в животном царстве. Стремление животных к контакту с твердыми телами называют сигмотаксисом. Ж. Леб это явление назвал стереотропизмом. Стремление животных навстречу раздражителю, например потокам воздуха, жидкости, принято обозначать термином реотаксис. Побуждение двигаться в направлении силы земного тяготения называют геотаксисом или геотропизмом, соответственно различают геотаксис положительный и отрицательный.

Возвращаясь к предмету нашего описания, касающегося чувствительности простейших к вибрации, следует сказать, что на ранних этапах эволюции животный мир еще не обладал способностью тонко дифференцировать в отдельности все виды механической энергии: колебания среды, давления, импульсы, гравитацию — скорее всего, все эти виды энергии воспринимались суммарно, всей структурой особи, а результаты их действий проявлялись в виде того или иного тропизма (таксиса).

Наиболее обширные исследования геотропизма у простейших проведены еще в конце прошлого века. Было установлено, что явление геотропизма определяется не только силами гравитации, но и другими видами раздражения: химическими, термическими, возможно, световыми и др. Окончательный выбор направления движений не в меньшей степени зависит от исходного функционального состояния. Вообще говоря, перемена знака таксиса (тропизма) *положительный—отрицательный* — явление довольно распространенное и наблюдается на самых различных видах живых существ — от простейших до человека. Это явление перемены знака также примечательно в том смысле, что отражает довольно общую биологическую реакцию; конечно, ответ определяется не природой и интенсивностью раздражителя, а природой и функциональным состоянием биологического объекта. Проявление этой закономерности реакции наблюдается на биологических системах различной сложности организации на всех этапах эволюции.

Физиологам хорошо известна зависимость характера ответной реакции нервно-мышечного аппарата от его лабильности, согласно учению Н. Е. Введенского. Теперь эта закономерность (зависимость конечной реакции от функционального состояния) наблюдается и на поведении простейших. Далее, эта закономерность проявляется у животных с более сложными системами в виде принципа доминанты А. А. Ухтомского. Она удивительно сходным образом проявляется в поведении простейших при отсутствии нервной системы, т. е. у животных, находящихся у самых истоков эволюции. Даже на этом уровне эволюции реакция на раздражение, по мнению зоолога С. И. Метельникова, является творческим актом. При ретроспективном взгляде на эволюцию, кажется априори, уже можно ожидать, что выбор образа действия особи любого уровня эволюции (как поступить?) в ответ на действие раздражителя будет определяться рядом причин, связанных с полом, возрастом, сезоном года и функциональным состоянием особи.

Исследования, проведенные на вирусах, бактериях, простейших, дают основание сделать вывод, что любая форма живой материи чувствительна к механическим колебаниям и что каждая из биологических структур

характеризуется специфической чувствительностью к определенным частотам вибрации. Из этого следует, что вибрация, как физический фактор окружающей среды, является непрременным участником формирования конечной биологической реакции объекта.

### **ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕХАНОРЕЦЕПТОРОВ ЖИВОТНЫХ К ЗВУКУ И ВИБРАЦИЯМ**

Наличие рецепторов, воспринимающих тот или иной вид энергии, является наиболее убедительным доказательством экологического и эволюционного значения этого вида энергии. Иными словами, действие этого фактора биологически необходимо для жизни особи, вида, иначе появление в эволюции механорецепторов было бы биологически неоправданным. К сожалению, в отношении рецепторов, воспринимающих механические колебания, и их эволюции мы не располагаем достаточными данными, чтобы с должной убедительностью продемонстрировать их особенности у животных различных таксономических групп. Отчасти это связано с тем, что виброрецепторы до сих пор еще не были предметом систематических исследований физиологов. Интерес к ним появился лишь в последние годы, и вызван он потребностями медицинской практики, так как все большая масса людей и со все большей интенсивностью подвергается действию механических колебаний. Более важной причиной недостатка наших знаний является крайне недостаточное изучение физической основы действия виброрецепторов. Дело в том, что физический принцип восприятия механической энергии является общим как в случае вибрации, так и в случаях звука, давления, гравитации. Его общность заключается в том, что любой из названных механических факторов адресатом своего действия имеет биологическую структуру. Именно структура (конструкция) есть точка приложения механической энергии. Этот принцип являлся и является физической основой возникновения поливалентных рецепторов, воспринимающих различные виды механической энергии: тактильные рецепторы, барорецепторы, виброрецепторы, звуковые (слуховые) рецепторы. В силу этого обстоятельства практически невозможно выделить «в чистом виде» специальные

виброрецепторы. Развитие животного мира на Земле, когда с увеличением числа видов и популяций все более усложнялись условия существования, нарастала интенсивность борьбы за существование и требовалась все более тонкая и точная дифференцировка внешней среды, привело к выделению высокочувствительных виброрецепторов. Однако и сейчас спорным является вопрос о наличии или отсутствии поливалентных форм механорецепторов у высших животных и человека. Все это значительно осложняет попытку дать сколько-нибудь полную характеристику эволюции виброрецепторов. Мы ограничимся лишь небольшим числом примеров описаний виброчувствительности и биологической роли механических колебаний у особей различных экосистем, далеко отстающих друг от друга в эволюционном ряду.

### Пресноводная гидра

Вероятно, во всех отношениях, в том числе и в отношении рецепторов, из всех кишечнорастных лучше всего изучена пресноводная гидра. История ее открытия, ее удивительные биологические свойства выделили гидру из всего царства животных, сделали ее одной из самых популярных «героинь» XVIII в.<sup>1</sup> Наиболее полные сведения обо всем, что касается гидры, собраны в прекрасной монографии зоолога И. И. Канаева.<sup>2</sup>

Относительно ее чувствительности к механическим колебаниям известно следующее. Еще в 1873 г. петербургский зоолог Н. Вагнер наблюдал сократительные движения гидры при малейшем колебании воды. Далее было установлено, что различные виды гидр обладают различной чувствительностью. Если у одного вида особи реагируют на слабое колебание воды, то для других видов, чтобы вызвать аналогичную реакцию, требуется нанести некоторое ранение, например укол иглой. Вагнер установил, что у гидр существует двойная чувствительность к механическим колебаниям: общая, или нелокализованная, и локализованная.

---

<sup>1</sup> Открытая Рамбле (1744) гидра и ее удивительные свойства, связанные с размножением и регенерацией, вызвали невиданный интерес не только ученых-специалистов, но и писателей, философов, политиков. Послы считали долгом информировать королей об этом «чуде», о проводимых исследованиях.

<sup>2</sup> И. И. Канаев. Гидра. Л., 1952. 372 с.

Особый интерес представляет нелокализованная чувствительность, так как здесь проявляется общая чувствительность биологических структур к механическим колебаниям. Если поместить гидру на часовое стекло, по которому затем ударить, например стеклянной палочкой, то в ответ на это гидра сравнительно быстро (1—3 с) сократится, и вскоре снова наступит расслабление. При повторном постукивании реакции сокращения и расслабления повторяются. При этом Вагнер заметил биологически очень важную закономерность. Оказалось, что гидра повторяет сокращение и последующее расслабление только в том случае, если ударять палочкой (во-первых) не через равные промежутки времени и (во-вторых) всякий раз с различной интенсивностью.

Иными словами, если раздражать строго ритмично и с постоянной интенсивностью, то к такой подаче сигнала гидра быстро адаптируется. Через 2—3 удара с равными промежутками времени гидра уже перестает сокращаться. Трудно сказать, почему именно постоянство (монотонность) ритма механических колебаний перестает быть раздражителем. Возможно, какие-то особые биологические условия привели к возникновению высокой чувствительности к внезапным механическим импульсам, угрожающим целостности особи. Когда же эти импульсы приобретают строго ритмичный характер, они уже становятся привычным раздражителем, который более не несет угрозы особи.

Говоря о так называемой локализованной чувствительности, следует отметить, что речь идет не о специальных рецепторах, а о способности отвечать на уколы иглой, что должно означать наличие чувствительности в локальном участке, размер которого определяется диаметром кончика иглы. При этом было показано — укол в любую часть тела вызывает сокращение гидры. Такая повсеместная чувствительность к механическим воздействиям биологически понятна, она обеспечивает своевременное возникновение реакции на угрозу, с какой бы стороны эта угроза ни приближалась. Несмотря на то что у пресноводной гидры до сих пор не найдены специальные механорецепторы, следует, однако, допустить наличие целой области, чувствительной к механическим раздражениям.

Дальнейшие опыты на гидре показали, что особь обладает так называемым осевым или, по терминологии английского физиолога Г. Чайльда, физиологическим градиентом. Суть его заключается в том, что чувствительность особи к различным ядам, как, впрочем, и к различным физическим факторам, в направлении к апикальной части гидры — повышается. При действии яда особь распадается, «сгорает» подобно бикфордову шнуру, причем распад начинается именно с апикальной, как наиболее чувствительной, части тела. Мы уже имели случаи отметить, у сравнительно примитивных форм животных рецепторы сравнительно слабо дифференцированы, часто оказываются поливалентными, выполняя различные функции: хемо-, термо-, механорецепции. Именно такими свойствами обладает апикальная часть тела гидры и ее щупальцы. Вероятно, наличием осевого физиологического градиента объясняется, например, реотропизм гидры.

### Медуза

Специальных исследований вибро- или механочувствительности медуз, насколько известно, не проводилось. Однако имеющиеся у медуз крупные тельца, возможно, по мнению зоологов, являются образованием механорецепторов, которые чувствительны к механическим колебаниям. Полагают, что медузы чувствительны к силам гравитации. Возможно, у этих форм имеется именно смешанный, поливалентный тип рецепторов. Значительно большие сведения имеются относительно механорецепторов у ктенафор. Английский биолог Р. Д. Хорридж еще в 1965 г. детально изучил тонкую структуру этих образований, которая представляет собой видоизмененные реснички (цилия). Поверхность дистальной части цилиа представлена плотным образованием, состоящим из секреторных клеток, между которыми располагаются особые продолговатые клетки с крупными ядрами, имеющие единственный твердый вырост — штоф или щупальцы. Это и есть чувствительный к механическим колебаниям рецептор.

Когда особь лежит неподвижно относительно неподвижной среды, щупальцы находятся в расслабленном состоянии. Но при определенной интенсивности колебаний в среде немедленно возникает реакция: цилиа вы-

брасывает стрекательную нить. Эта нить парализует жертву или хищника, чьи движения в воде были источником колебаний. О чувствительности цилии можно судить по следующим наблюдениям. Если капля воды падает на поверхность в одном метре от особи, то это уже вызывает стрекание нескольких цилий. Особь способна различать интенсивность колебаний и в соответствии с этим отвечает либо локальной реакцией, либо общей. Колебания с частотой 10 Гц амплитудой 100 мкм воспринимаются особью и, по-видимому, являются для нее пороговыми. Даже изолированные щупальцы сохраняют чувствительность к вибрации. Если через громкоговоритель вызвать колебания с частотой 10 Гц и амплитудой в несколько микрон, то изолированные щупальцы обнаруживают характерную для них реакцию — выстреливают стрекательные нити. Интересно, что щупальцы служат также для ориентировки в окружающей среде, для определения направления движения: вверх, вниз, т. е. в какой-то степени выполняют функцию рецептора гравитации. Отмечается высокая виброчувствительность щупалец. Так, особи некоторых видов способны улавливать колебания с амплитудой 300 мкм под водой, вызванные иглой, прикрепленной к мембране громкоговорителя. Реакция выражается в схватывании «жертвы», которая является источником этих колебаний. При этом наблюдается весьма примечательная закономерность: схватывания жертвы не происходит, если интенсивность колебаний превосходит некий уровень, характерный для колебаний, вызываемых возможным хищником или возможной жертвой.

Нельзя не видеть в рассмотренном факте примера очень тонкой избирательности по силе и, надо полагать, по частоте действующего механического фактора. Биологические, и в особенности с энергетической точки зрения, было бы крайне невыгодным реагировать на механические колебания любой частоты и интенсивности. Плодотворная деятельность отбора закрепила чувствительность только к тем частотам и интенсивностям колебаний, которые несут жизненно важную информацию, оставляя без внимания всякого рода случайные колебания, не имеющие биологического значения для данного вида животных.

На ряде примеров наглядно демонстрируется связь вибрации с питанием животных. Как правило, вибрация среды немедленно вызывает движение животного в сторону источника этой вибрации. Такая реакция, вероятно, связана с питанием планктоном, и в этом случае существенное значение имеют основные параметры вибрации: частоты не более 3 Гц, при амплитуде 2—3 мкм. Иными словами, и в этом случае особи данного вида имеют свои жизненно важные для них частоты и интенсивности внешних механических колебаний, на которые они обязаны реагировать в интересах питания или защиты от хищников.

Интересные исследования были проведены на колонии гидромедуз. Движение воды (колебания) производилось специальным датчиком, соединенным с мембраной громкоговорителя. Датчик помещался между двумя стволами полипа на одинаковом расстоянии. Затем вызывались колебания, и наблюдалась реакция. При достижении определенного порога по амплитуде оба ствола изгибались под углом  $90^\circ$  в сторону датчика. Как оказалось, порог лежит в области 2.5—3 мкм. Однако он находится в прямой зависимости от расстояния полипа от датчика. Что касается частоты колебаний, то, по данным авторов, оптимальной является частота 3 Гц; свыше 5 Гц реакция уже отсутствует. Нижние границы не установлены. Известно при этом, что полипы отвечают и на одиночные импульсы, так что, вероятно, определяющим здесь являются не частоты, а амплитуды или пропорциональная им интенсивность колебаний. Полипы реагируют и на поток воды, если последний осуществляется ритмично.

Заслуживает внимания теория возникновения чувствительности к механическим колебаниям. Полагают, что чувствительность в данном случае связана не со специальными структурными образованиями, а с общей структурой полипа. Чувствительность к механическому фактору заложена в самой живой материи, в ее структурной организации. Были выполнены исследования, которые показали, что при увеличении вязкости среды (например, при добавлении метилцеллюлозы) эффекта вибрации не наблюдается. Этот факт кажется нам весьма интересным и указывает на возможность объяснить возникновение чувствительности к механическим

колебаниям исходя из природы структурной организации живой материи.

Заслуживают внимания исследования, проведенные на актиниях. При достаточно сильном раздражении особи — ретракторные мышцы, сфинктер, сокращаясь, быстро закрывают полость. Это обычный безусловный рефлекс, наблюдаемый при электрической стимуляции. Но какие натуральные раздражители вызывают этот рефлекс? Попытка вызвать его термическим раздражением оказалась безуспешной. Актинии весьма чувствительны к механическим раздражениям. Приложение стеклянной палочки к стволу анемоны вызывает рефлекс сокращения; если раздражение наносить с интервалом в 1 с, то рефлекс вскоре исчезает, вероятно вследствие наступившей адаптации. Требуются перерывы в 2—5 мин, чтобы вновь появился рефлекс на последующее раздражение. Вопрос о структуре, воспринимающей механические колебания у актиний, изучен недостаточно. Полагают, что область ротового диска, вероятно в первую очередь щупальца, в 4000 раз более чувствительна, чем стволы и подошва. Возможно, что чувствительность зависит от толщины слоя мезоглеи; у щупалец он составляет 10 мкм, у педали — 200 мкм, а у края сфинктера — до 1.5 мм. О сравнительной характеристике виброрецепции в эволюционном аспекте можно прочесть в сводках: К. В. Беклемишева (1966), Б. Проссера и Ф. Брауна (1957).

### **Членистоногие**

Из всех видов животного царства членистоногие являются самыми многочисленными. Они в буквальном смысле — космополиты, встречаясь во всех широтах нашей планеты, от Северного полюса до берегов Антарктиды. Ими завоеваны все среды: толща воды, суша, воздух. Одним из неперемных условий процветания вида, как, впрочем, и любого таксона, является степень совершенства анализа окружающей среды: чем более совершенна оценка биологически важных условий окружающей среды, тем, при прочих равных условиях, больше шансов на процветание вида.

Как и в предыдущих разделах, вопрос о роли механических факторов в процессе эволюции мы будем оценивать по наличию механорецепторов, по их специ-

фической характеристике и по биологической роли реакции на механические раздражения. Основной фактический материал будет относиться к классу насекомых.

### Насекомые

Начиная от кишечнополостных, эволюция животного мира пошла по двум самостоятельным линиям: первичноротые и вторичноротые. На вершине пути развития первичноротых находятся насекомые. По мнению академика А. А. Заварзина, уровень развития нервной системы насекомых столь же высок, как и у высших представителей вторичноротых — высших позвоночных и человека. По степени совершенства нервной системы можно судить о степени совершенства организации всего организма. «Организм, — писал А. А. Заварзин, — настолько отражен в своей нервной системе, что иногда в известном приближении можно подменить определение организма описанием его нервной системы. Такое соответствие можно объяснить только тем, что развитие организма идет вместе с развитием его нервной системы».

Основная биологическая особенность класса насекомых заключается в необыкновенной пластичности видового состава, чем, вероятно, и объясняется такое множество видов, что до сих пор практически не удается даже приблизительно установить их число. Профессор Б. Н. Шванвич называет наиболее реальную, по его мнению, цифру — 600 тыс. видов, тогда как, по мнению других авторов, число видов достигает 10 млн. (!)

Отметим еще некоторые особенности насекомых, касающиеся их общей организации, которые имеют прямое отношение к вопросу о роли механических факторов в эволюционном процессе. Укажем прежде всего на их способность к полету. Эта особенность отличает их от всех классов и типов беспозвоночных. Способность к полету не только дала возможность насекомым завоевать сушу и воздух, но и явилась одним из мощных стимулов формирования совершенной структуры организма и его рецепторного аппарата. Полет вызвал к жизни точную координацию деятельности нервномышечных аппаратов, необходимость в срочной информации, касающейся пространственной и временной ориентации, скорости полета, переработку этой информа-

ции, чтобы сделать выбор наиболее биологически целесообразной реакции. Уже сам по себе факт перелета предполагает наличие координирующего центра, который на основании цепи нервно-гуморальных реакций определяет, вероятно, и цель, и необходимость полета.

Следующая особенность, весьма характерная для насекомых, относится к структурной композиции организма. Суть этой особенности можно было бы обозначить *принципом экономии места или принципом максимального использования площади поверхности*. Речь действительно идет об использовании «каждой пяди полезной площади» для размещения различных рецепторов. Так, например, конечности, кроме функции передвижения, выполняют и хватательную функцию, и, кроме того, на их поверхности локализованы органы равновесия, химического и тактильного чувства, вибрационные и слуховые рецепторы. Вероятно, эта экономия места вызвана малыми линейными размерами особей. Но вообще насекомые по своим размерам отличаются большими колебаниями. Длина самых мелких представителей, например жуков-наездников, составляет 0.2 мм, а соотношение их длины к длине наиболее крупного представителя — южно-американской бабочке — 1 : 5500 (!), тогда как в остальном мире животных самый большой коэффициент составляет, например у млекопитающих, 1 : 836. По-видимому, для процветания вида на первое место выступают средства ориентации и управления, а линейные размеры, и в первую очередь площади поверхности, важны лишь в той степени, в какой они позволяют разместить необходимый минимум «управленческого» аппарата, характерного для класса насекомых. Первостепенная важность этого аппарата подчеркивается не только тем, что он сохраняется и при минимальных размерах особи, но как признак своего класса он сохраняется и в тех случаях, когда какой-либо вид переходит к паразитизму. Наконец, отметим еще одну черту, характерную для всех членистоногих — наличие кутикулы. Вообще кутикулярные образования широко распространены среди самых различных классов беспозвоночных независимо от их уровня эволюционного развития.

Говоря о насекомых, следует подчеркнуть, что сплошной кутикулярный слой является не только наружным скелетом, несущим опорную функцию. Он вы-

полняет и ряд других жизненно важных функций, защищает структуры с различными функциональными назначениями: секреторные, двигательные, рецепторные и др. от механических повреждений, регулирует проницаемость воды и растворенных в ней различных химических веществ, возможно служит резонатором механических колебаний. Образование сплошного кутикулярного слоя привело к необходимости дальнейшего погружения нервного аппарата в толщу субкутикулярных тканей и к большей их централизации. При этом рецепторный аппарат, воспринимающий механические колебания, вынесен на поверхность в виде волосков, шипиков, щетинок и т. д.

Морфология механорецепторов крайне разнообразна у различных представителей насекомых. Однако общая схема рецепции довольно проста. Вся система восприятия и передачи раздражений состоит из трех самостоятельных звеньев: чувствительного волокна не нервной природы, выступающего на поверхности хитинового покрова; трихогенной клетки, апикальная часть которой имеет сочленение с базальной частью волоска, и нервного окончания в области сочленений. Иннервационный аппарат, обеспечивающий чувствительные образования, — гиподермального происхождения. Помимо только что описанной структуры, несущей функцию кожной чувствительности, у насекомых имеются и более сложные, и, вероятно, более специализированные функции сейсмо- и звукорецепции. К ним относятся джонстонов орган, хордотональный и тимпанальные органы. Наличие у насекомых повышенной чувствительности к механическим колебаниям давно уже было замечено биологами.

Существенный интерес представляют исследования на муравьях. Специально для опытов муравьи выращивались в лабораторных условиях. Опыты состояли в следующем. Гнездо муравьев помещалось на лист белой бумаги, расположенный вблизи источника звуковых колебаний, каковым служил либо гальтонов свисток, дающий колебания от 10 до 60 кГц, либо виолончель, либо пианино, диапазон частот которых в пределах 27—4176 Гц. Как оказалось, ни один из этих генерируемых звуков не вызывает заметной реакции: муравьи глухи. Но если поместить гнездо на звучащее пианино или виолончель, то эффект действия вибрации

субстрата незамедлительно проявляется — муравьи моментально убегают с вибрирующего поля. Как оказалось далее, частота вибрации субстрата не имеет значения, можно дно чашки Петри потереть о твердый объект или постучать по столу — результат тот же. Иногда гнездо помещалось под водой и, следовательно, колебания передавались через жидкость, и в этих условиях бурная реакция на колебания наблюдалась постоянно. Было установлено, что границы восприятия частот колебаний у различных видов резко различны и колеблются в пределах от 522 до 4175 Гц.

Заслуживают внимания исследования на изолированных конечностях кузнечика. С нервов конечностей отводился потенциал действия. Раздражение вызывалось двумя способами: с помощью зуммера с усилителем, дающим колебания от 30 до 20 000 Гц, звуковое давление при этом менялось в пределах от 0.04 до 1000 м/бар и с помощью громкоговорителя производилось сотрясение субстрата с препаратом изолированных конечностей. Амплитуда колебаний пропорциональна силе тока, пропускаемого через катушку. Результаты исследования показали, что и звук, и сотрясение вызывают ток действия в нерве. Этот эффект отсутствует, если нерв занаркотизирован. Возникновение потенциала в результате вибрации наблюдается при температуре в пределах 25—35 °С.

Интересными являются данные о различных чувствительностях к звуку и вибрации передней, средней и задней пар конечностей, а также различие чувствительности к звуку и вибрации в зависимости от вида насекомых. Первая пара конечностей, как теперь принято считать, несет на себе органы слуха, и следовательно, воспринимает звуковые колебания. Было показано, что у сверчка-самки диапазон воспринимаемых частот от 800 до 45 000 Гц, а у самца сверчка — 435—27 800 Гц. Изолированный препарат передних конечностей самки высокочувствителен к натуральным звукам стредуляции самца. Так, стредуляция самца, удаленного от препарата самки на 38 м, все еще вызывает в нем ток действия, тогда как препараты средних и задних пар конечностей не реагируют на стредуляцию с расстояния в 20 см. Порог для чистых тонов мало меняется при частотах от 100 до 1000 Гц. У одного вида саранчовых чувствительность резко падает в области 3000 Гц,

а у других (кузнечиков) — 8000 Гц. Чувствительность к звуковым (стредуляционным) раздражениям является видовым признаком. Например, препарат передних конечностей самки «слышит» звуки, производимые самцом не далее чем за 3 м. Биологически важной является способность, прежде всего самок, оценивать звук не только по интенсивности, но и по частотам. В дополнение к характеристике чувствительности передней пары конечностей к механическим колебаниям следует указать, что вокальный звук ниже 2000 Гц также вызывает ток действия, однако специфическим для них является восприятие высоких тонов. Что касается общего принципа восприятия звука тимпанальным органом, локализованным на передней паре конечностей, то, вероятно, он работает как приемник градиента давления.

Механорецепторы средней и задней пар конечностей характеризуются иными свойствами. Прежде всего они оказались весьма чувствительными к низким частотам звуковых колебаний, но, пожалуй, еще более характерным для них является высокая виброчувствительность. Порог раздражения, выраженный в единицах давления, для второй и третьей пар конечностей при частотах 7—8 кГц в 1000 раз и более ниже, чем для первой пары. Субгенуальный орган, локализованный на средней паре конечностей, особо чувствителен к вибрациям. Степень чувствительности его не имеет себе равных среди всех до сих пор известных в животном царстве механорецепторов. У серого кузнечика порог чувствительности по амплитуде составляет  $3 \cdot 6^{-9}$  см или 0.36 Å; у другого вида — зеленого кузнечика  $0.6 \cdot 10^{-9}$  см (0.7 Å). У человека порог чувствительности по амплитуде равен  $3 \cdot 10^{-6}$  см. Следовательно, виброчувствительность серого кузнечика в 1000 раз выше, чем у человека. При исследовании импульсной активности тимпанального органа саранчовых были обнаружены два составляющих ответа: один связан с низкочастотной стимуляцией порядка 3—10 Гц, второй — с высокочастотной, 15—20 кГц. В основе этих различий лежат нейроны, рецепторное звено которых обладает различной чувствительностью к звуковым стимулам разной частоты и интенсивности. На стимуляцию низкочастотными колебаниями, вероятно, реагируют все нейроны, при этом наблюдается ярко выраженная фаза ответа, состоящая

из группы импульсов, вслед за которой идет фаза торможения. Принципиальным отличием механорецепторов от всех остальных видов рецепции является их структурная организация, обеспечивающая превращение энергии из механической в электрическую; другие же особенности в той или иной мере характерны для всех рецепторов.

Исследования на осах позволили обнаружить высокую чувствительность этих насекомых к сотрясению. При легком постукивании гнезда (улья) насекомые быстро выбегают, причем, как можно понять, в целях выяснения причины тревоги. Если никакой угрозы семье нет, то спокойствие быстро восстанавливается. Было замечено, что на сигнал тревоги первыми и наиболее возбужденными выбегают самки, которые активно исследуют ситуацию и первыми, в случае отсутствия опасности, возвращаются. Осы обладают высокой тактильной чувствительностью, на прикосновение отвечают рефлексом удаления раздражителя. Касаясь структуры осязательных волосков, исследователи отмечают исключительное их разнообразие, вызванное условиями обитания вида. Насекомые способны дифференцировать тактильное чувство: естественное прикосновение листьев, стеблей растений или иного твердого субстрата не вызывает реакции, тогда как на касание, имитирующее движение хищника, возникает бурная оборонительная реакция. Строительная и «домашняя» деятельность обычно протекает в темноте, для ориентировки и общения друг с другом; для оценки строительного материала постепенное значение имеют именно сенсиллы или чувствующие волоски, как специальные структуры, первично чувствующие механическое раздражение. Строение сенсилл с выступающим на поверхности тела волоском дает возможность определять направление источника колебаний, чем и обеспечивают точные движения.

Как уже отмечалось, различные виды насекомых особенно чувствительны к механическим колебаниям как по частоте, так и по интенсивности. Если, например, во время движения к поющему самцу самка обнаружит более интенсивное звучание, — пусть даже в противоположной стороне, — то направление будет изменено — самка будет двигаться в сторону более интенсивного звука. Самка безошибочно движется к самцу,

даже будучи ослепленной. Некоторые насекомые при соперничестве могут менять частоту и ритм звуковых сигналов.

Приведем еще один пример из жизни насекомых, свидетельствующий о биологической значимости механорецепторов, заимствований у знаменитого французского энтомолога Ж. Фабра.

Песочная аммофила — роющее насекомое — охотится на гусениц озимого червя, живущего в земле. Как аммофила находит место расположения червя? Наиболее вероятным инструментом, с помощью которого отыскивается червь, служат усики. С их помощью аммофила ощупывает почву и, по-видимому, улавливает малейшие ее колебания, производимые движением червя, которые и передаются на поверхность почвы. Сам Фабр не говорил о наличии у аммофил высокочувствительных рецепторов, но вряд ли чем-нибудь иным можно объяснить это безошибочное поведение, кроме как наличием высокоспециализированных механорецепторов.

Из других членистоногих остановимся на пауках, у которых биологический смысл механорецепции выражен особенно наглядно. По сложности инстинктов и соответственно по сложности поведения отряд пауков находится на уровне высших повзonoчных. Структурной единицей, воспринимающей механическую энергию, являются чувствующие волоски, во множестве локализованные на подпальцах, хелицерах, на ногах, на поверхности головогруди, а также на контактирующей с субстратом части брюшка. Вопрос о наличии у пауков органов слуха остается еще не решенным, во всяком случае никто не давал описания морфологии их органов слуха. Вместе с тем, по-видимому, никто из физиологов не сомневается в способности пауков воспринимать звуковые колебания, причем необычно низкой интенсивности. Так, паук ощущает колебания воздуха от летящей в нескольких сантиметрах от него мухи. Известно, например, что человеческое ухо не воспринимает стрекотания самки сверчка, но это стрекотание привлекает самцов-сверчков, а это значит, что они располагают каким-то прибором, по чувствительности превосходящим слуховой рецептор человека... Возможно, что некоторые противоречивые суждения по поводу звуковых восприятий у пауков отчасти также

связаны с тем, что нет точного определения понятия *слышать*, что дает повод каждому из исследователей вкладывать в это понятие тот смысл, который ему кажется наиболее верным.

Вообще для животного антропоморфный термин *слышать* неприменим. Китообразные, летучие мыши, многие бабочки воспринимают ультразвуковые колебания порядка 100 кГц и более. Моллюски, рыбы, многие насекомые способны воспринимать колебания с частотой ниже 1—10 Гц, не слышимые человеком. Все это указывает на некоторую неопределенность термина *слышать*. Понятие *слышать* в широком смысле слова следовало бы обозначать если не специальным термином, которого еще нет в литературном обиходе, то пока описательно, как способность воспринимать механические колебания.

Приведем несколько примеров, демонстрирующих высокую чувствительность паука к механической энергии. Более 100 лет тому назад были проведены исследования способности пауков воспринимать механические колебания, передаваемые через сеть паутины, ставя звучащий камертон вдали от характерного для пауков «наблюдательного пункта» — их гнезд, где они обычно находятся. Было замечено, как паук стремительно выбегает из гнезда, направляясь к центру, откуда радиально расходятся нити паутины, и уже от центра — точно к источнику колебаний. Эти наблюдения говорят о двух важных характеристиках механорецепторов. Во-первых, высокая чувствительность колебаний субстрата, передаваемых по нитям паутины. Во-вторых, направление движения к цели определяется натяжением нитей. Более подробную характеристику механорецепторов пауков дали исследования на различных видах с применением электрофизиологической методики. Изолированные конечности, несущие механорецепторы, раздражались колебанием мембраны громкоговорителя, и с отходящего нерва снимались биоэлектрические импульсы. Показано, что чувствительность к колебаниям в значительной степени зависит от частоты. Если раздражать нерв с частотой от 5 до 100 Гц, то амплитудный порог при этом равен  $7 \cdot 10^{-3}$  см и в пределах этих частот не меняется. Однако при увеличении частоты, например до 600 Гц, амплитуда падает до  $6 \cdot 10^{-8}$  см; при дальнейшем увеличении частоты меха-

нических импульсов (до 4000 Гц) амплитуда несколько повышается, оставаясь равной приблизительно  $10^{-7}$  см. Как видно, степень чувствительности приближается к самой высокой чувствительности из всех ныне известных механорецепторов. (Самая высокая чувствительность наблюдается у американского таракана —  $3 \cdot 10^{-9}$  см, что составляет лишь половину диаметра атома водорода). Заслуживает внимания различие частоты раздражения, при которой наблюдается максимальная чувствительность. Так, у одного вида таракана минимальная амплитуда наблюдается при частоте 1700 Гц, а у другого — при 600 Гц. Частотная зависимость чувствительности, по-видимому, является видовым признаком.

Особый интерес представляет механорецепция у тех видов пауков, которые не плетут паутинных сетей для ловли мух. Обычно в таких случаях устраиваются на листьях гнезда только для откладки коконов, а охота осуществляется на поверхности воды. Заслуживают внимания исследования, выполненные на одном из представителей пауков, не выющих паутины (пиратус пиратус), у которых орган, воспринимающий вибрацию, расположен на конечностях. Охотничий прием заключается в том, что паук, лежа на листе, опускает конечности на поверхность воды. Муха, попавшая в воду, производит импульсные движения, вызывая колебания поверхностного слоя воды. Эти колебания, улавливаемые пауком, являются для него сигналом к нападению на жертву.

Экспериментальные исследования позволили обнаружить ряд биологически важных деталей. Прежде всего о частотах. С помощью электромагнитного датчика можно задавать частоты колебаний в очень широком диапазоне. Однако опыты показали, что особь отвечает соответствующей поведенческой реакцией только на узкую зону частот — от 19 до 25 Гц, амплитуда при этом составляет 1—1.3 мм. График зависимости эффекта от частоты демонстрирует высокую добротность резонанса в пределах 21—22 Гц. Вопрос о том, почему резонансной частотой является именно 21—22 Гц, остается до сих пор необъяснимым.

Дело в том, что летающие насекомые, которые и являются объектами нападения для паука, имеют частоты колебаний крыльев в полете гораздо выше и больше,

в зависимости от вида: 28, 110, 240, 380, 594 Гц... Можно допустить снижение частоты колебаний крыльев насекомых при их погружении в воду, однако невозможно представить себе физически подобную частотную нивелировку, чтобы насекомое, попавшее в воду, производило колебания в пределах 19—25 Гц, имеющих для пауков сигнальное значение. Интенсивность проявления реакции на колебания именно в пределах этих частот (19—25 Гц) оказалась в сильной степени зависимой от возраста, пола и голода. Голодный паук бросается к источнику колебаний и с большими частотами, чем 19—25 Гц, и большей интенсивности. Эта поведенческая реакция повторяется многократно. Сытый же паук уже через 3—5 повторений перестает на них реагировать. Зависимость чувствительности от пола проявляется в том, что самки менее реактивны и на вибрацию не реагируют столь бурно, как самцы.

На этом мы закончим описание биологической характеристики механорецепторов у представителей первичноротых и рассмотрим особенности механорецепции у представителей второй параллельной линии эволюции — вторичноротых.

## **Рыбы**

Рыбы обладают уже хорошо обособленными морфологически и тонкодифференцированными по чувствительности механорецепторами. Их развитию сопутствовали и несомненно способствовали два параллельных процесса: дальнейшая цефализация и дифференцировка нервной системы, а также появление одной анатомической детали в скелете рыб — челюстей. Этому анатомическому добавлению придается особое значение в связи с тем, что челюсти — это орган хищника, орган лова жертвы. Это обстоятельство вызвало к жизни необходимость развития рецепторов, дающих моментальную информацию об окружающей среде. Одним из таких факторов, с помощью которого рыбы получают информацию о скорости течения, о приближении хищника или жертвы, о направлении движения, являются механорецепторы. В процессе эволюции у рыб выделилась особая область тела, где сосредоточены органы механического чувства или, как их теперь называют, органы боковой линии. Эта топографически обособленная

система впервые возникла у круглоротых и хорошо развита у рыб и амфибий. На основании многочисленных исследований установлена сейсмодатчик природная органов системы боковой линии; прослежены закладка этих органов и их связь с нервной системой в процессе эмбриогенеза.

Различают 3 группы сенсорных органов и соответствующую им иннервацию. Во-первых, органы общей кожной системы, свободные нервные окончания, связанные с задними рогами спинного мозга, выполняющие функцию осязания. Во-вторых, органы системы боковой линии — невромасты, которые иннервируются волокнами бокового нерва, берущего начало в области головного мозга и мозжечка. И, в-третьих, система кожных органов, связанная ветвями блуждающего и лицевого нервов. У большинства позвоночных они расположены на кожных сосочках в ротовой полости и только у рыб — на поверхности тела.

Уже при беглом взгляде на топографию чувствующих образований можно судить о значении в жизни и поведении рыб рецепторов, воспринимающих различные виды механической энергии. Показана роль рецепторного аппарата в поведении особи, в зависимости от экологических условий. Так, зародыши, только что вышедшие из оболочки, малоподвижны, обычно прикрепляются передним концом к стеблям растений и другим неподвижным предметам. В это время молодь нечувствительна ни к свету, ни к колебаниям воды. Однако весьма чувствительна к активным раздражениям: от прикосновения быстро отрывается и уплывает. В личиночную стадию, когда эндогенное питание заканчивается и требуется самостоятельно добывать пищу, главную роль начинает играть зрительный рецептор. Вместе с тем заканчивается формирование невромастов, их связи с нервными центрами. В мальковый период, когда особи уходят в заросли с ограниченным освещением, ведущее значение в поведении рыб, в добыче пищи приобретают механорецепторы. Говоря о видовых особенностях, отмечают, что, например, для крупных хищников нет необходимости улавливать слабые колебания воды, и в соответствии с этим у них каналы оказываются закрытыми (севрюга, треска и др.). У щук невромасты открыты только на туловище.

Дальнейший шаг в раскрытии более тонкой организации органов боковой линии был сделан с помощью электронного микроскопа. Было показано, что боковая линия представляет собой сеть разветвленных каналов, выстланных сенсорными клетками, к которым подходят нервные волокна. Вообще сенсорные клетки боковой линии идентичны волосковым клеткам внутреннего уха. Обнаружены два рода волокон, иннервирующих нервные клетки: тонкие и толстые. Электрофизиологическими исследованиями было установлено, что существуют два класса сенсорных единиц: медленно адаптирующиеся, которые к тому же характеризуются низким порогом чувствительности, и быстро адаптирующиеся, малочувствительные.

Если пропускать поток воды через канал боковой линии попеременно с различными скоростями, то с отходящих от определенного участка боковой линии нервов снимается потенциал. Величина этого потенциала имеет максимум при некоторой оптимальной скорости потока. Как оказалось, такой же по величине потенциал (максимальный) наблюдается при искусственной стимуляции нерва частотой в 100 Гц. Следовательно, наиболее чувствительная скорость потока соответствует чувствительности нерва к стимуляции с частотой 100 Гц. Из этого наблюдения также следует вывод, что животные обладают надежным прибором для оценки скорости собственного продвижения.

Физиологические исследования функций боковой линии с использованием условнорефлекторной методики были проведены на представителях карповых. Исследования проводились на интактных особях и особях с удаленной боковой линией. Было установлено, что рыбы воспринимают колебания воды, вызываемые твердыми предметами. Оказалось, далее, что рыбы различают размер предмета, от которого идут колебания. При удалении боковой линии выработанная реакция на колебания воды от твердого предмета исчезает. Вместе с тем допускается возможность восприятия механических колебаний среды и помимо боковой линии. Такая возможность вполне реальна, так как эпидермис рыб богат чувствительными клетками, рассеянными по всей поверхности тела и которые, по-видимому, несут функцию осязания и способны реагировать на низкочастотные колебания. Подчеркивается важность рецепторов

боковой линии. Эти рецепторы обеспечивают не только успешный поиск пищи, успешное нападение или защиту, но и дают возможность распознавать особей своего вида, что является необходимой предпосылкой стайных рыб в формировании косяков, а это обстоятельство в свою очередь является необходимым условием для воспроизведения потомства.

Представлялось интересным выяснить роль зрительных рецепторов в реакции рыб на предмет, производящий колебания. Оказалось, что ослепленная рыба не только не утрачивает способности ощущать колебания, но более того — точно, безошибочно схватывает, если в качестве источника колебаний была жертва, которой данный вид рыбы обычно питается. Интересна деталь — если удалить боковую линию, то остается способность особи воспринимать частоты лишь в пределах 3—30 Гц.

Аналогичные исследования, но с более четко отработанной методикой условных рефлексов, были выполнены на карасях и золотой рыбке. Условный рефлекс вырабатывался на вибрацию с частотой 1—48 Гц и от 20 Гц и выше. Как правило, рыба подплывает к кормушке на вибрационный сигнал уже через 6—22 сочетания. Если денервировать боковую линию, то условный рефлекс не вырабатывается. Следовательно, низкочастотные колебания воспринимаются органами боковой линии, импульсы с которой замыкаются в соответствующих отделах центральной нервной системы, где формируется условный рефлекс. Как оказалось далее, при денервации боковой линии условный рефлекс не вырабатывается только на частоты 1—16 Гц. Если же увеличить частоту до 20—25 Гц, рефлекс удастся выработать. Особенно легко вырабатывается условный рефлекс на более высокие частоты, например на 50 Гц. Если предварительно выработать условный рефлекс на различные частоты, а затем произвести денервацию, то вначале рефлекс исчезает, а потом его легко удастся восстановить, но лишь на частоты 20—25 Гц. На частоту 50 Гц условный рефлекс во всех случаях вырабатывается легко. Из этих данных следует, что условные рефлексы образуются на вибрацию как через органы боковой линии, так и через орган слуха. Но каждый из этих органов обладает своей частотной характеристикой. Боковая линия восприни-

мают колебания от 1 до 25 Гц, слуховой анализатор — от 18 Гц и выше. В области частот от 18 до 26 Гц колебания воспринимаются и боковой линией, и органами слуха. Возможно, в этом есть и определенный биологический смысл, так как восприятие частот одной и той же области двумя органами гарантирует надежность того, что сигнал о биологическом действии механических колебаний в данной области частот будет принят животным.

Важным моментом в рассмотренных исследованиях является доказательство того, что боковая линия рыб представляет собой набор обособленных структур, высокочувствительных к механическим воздействиям, главным образом к вибрациям низкого диапазона частот, от 1 до 20—25 Гц. Следует подчеркнуть, что для многих биологических объектов характерна высокая чувствительность к низким частотам колебаний: инфразвуковая и ближайшая к ней звуковая области спектра. Высокая чувствительность рыб к низкочастотным колебаниям хорошо иллюстрируется в ряде исследований, проведенных на четырех видах рыб Черного моря: морская змейка, травяной бычок, каменный окунь и морской ерш. Обычный способ добывания пищи у морской змейки заключается в том, что, зарываясь в песок, она подстерегает свою жертву: мелких рыбок, креветок, крабов. При приближении жертвы змейка бросается и захватывает добычу. Можно было бы полагать, что в этой операции главную роль играет зрительный рецептор. Однако это не так. Ослепленная змейка также безошибочно бросается на жертву и захватывает ее без промаха. Морской ерш также является хищником, причем реагирует только на подвижные жертвы. Как и змейка, ослепленный ерш безошибочно определяет направление движений жертвы и, по-видимому, расстояние до нее, что особенно важно. Если стеклянной палочкой произвести колебания воды на расстоянии 30—35 см от ослепленной особи, то в ответ на это последует лишь поднятие колючего спинного плавника. Если источник колебаний находится на расстоянии 5—6 см, ерш незамедлительно бросается, схватывая колеблющийся предмет.

Опыты, проведенные на травяном бычке и каменном окуне, дали те же результаты: ослепленные рыбы продолжали с таким же успехом определять объект пита-

ния, направление движения, расстояние до него по интенсивности производимых им колебаний воды. Имеются некоторые видовые различия. Так, вероятно, змейка более чувствительна к колебаниям, судя по тому что уже с расстояния 30—40 см она бросается на жертву. Каменный окунь, являясь сильным хищником, весьма чувствителен к колебаниям. К группе с высокой сейсмочувствительностью относятся виды, близкие по биологии питания: щука, окунь, судак. Из осетровых высокой сейсмочувствительностью обладает белуга.

Описанием механорецепции у рыб мы ограничим перечень примеров, касающихся роли механических колебаний в жизни животных в условиях водной среды. Хотя звук и вибрация имеют одну и ту же физическую природу, их распространение в воздухе и в водной среде имеет свои особенности. Звук, генерируемый в атмосфере, при столкновении с водной поверхностью большей частью отражается; звуковая волна, вошедшая в толщу воды, в зависимости от плотности последней, теряет амплитуду и соответственно интенсивность колебаний. В то же время скорость распространения волны в водной среде примерно в 4 раза выше. При анализе частотной характеристики механических колебаний в водной среде видно, что она относится к нижней части спектра, затрагивая низкочастотную область звука. Во всяком случае для жизни животных, о которых шла речь в этом обзоре, жизненно важное значение имеют механические колебания низкочастотной области спектра, в пределах от одного до нескольких сот герц.

## Амфибии

Класс амфибий представляет собой дальнейший этап эволюции позвоночных. Мы лишь кратко остановимся на чувствительности животных этого класса, заметив при этом, что здесь обнаруживается более высокая морфологическая специализация для восприятия звука и вибрации. Кроме усложнений в структуре и функции механорецепторов у амфибий впервые в эволюции животного мира появились рецепторы в мышцах, так называемые *мышечные веретена*. Организм приобрел важнейший источник информации о внутреннем состоянии. При незначительном растяжении веретена в ре-

зультате деформации структуры возникает потенциал, который в свою очередь возбуждает окончание чувствительного нервного волокна. Именно мышечные веретена явились структурной основой «мышечного чувства» (И. М. Сеченов). При исследовании механорецепторов амфибии обращено внимание на особенность их адаптации. Как оказалось, есть частоты механической стимуляции, при которых адаптация менее всего выражена. Такой частотой для раздражения, например, рецепторов лягушки является 200 Гц. Как мы увидим ниже, механическая стимуляция с частотой 200 Гц оказывается наиболее эффективной для самых разных типов механорецепторов и самых различных классов животных.<sup>1</sup> Эти рецепторы, различные по своей структуре, воспринимают, по-видимому, все виды механических воздействий: давление, колебания воды, воздуха, прикосновение твердых предметов и др.; показана их высокая чувствительность. Так, если капля жидкости падает на участок кожи амфибий с высоты 5 мм, то в отходящих ветвях регистрируется ток действия.

## Рептилии

Выше уже отмечалось, что животные, чья жизнь связана с длительным пребыванием в земле, должны быть особо чувствительны к механическим колебаниям. С этой точки зрения, большой интерес представляют исследования механорецепции класса пресмыкающихся, и особенно у представителей подотряда змей. К сожалению, таких исследований крайне мало, и их результаты часто противоречивы. Некоторые авторы считают, что у змей хорошо развит слух, другие же, напротив, заключают, что змеи глухи. Противоречие это отчасти может быть связано с недостаточно четким разграничением понятий *слышать* и *воспринимать* (слышать колебания). Из того факта, что ящерицы и змеи чувствительны к различным шорохам, колебаниям почвы, субстрата, еще нельзя сделать вывод, что животные слышат. Интересные наблюдения над гекконами, серым вараном, желтопузиком и другими представите-

---

<sup>1</sup> Вероятно, во всех тех случаях, когда частота вибрации 200 Гц оказывается наиболее эффективной, мы имеем дело с родственными структурами, для которых эта частота является резонансной.

лями класса пресмыкающихся выполнены при добыче ими пищи. Хищнику необходимо заметить и опознать жертву, в этом ему помогают зрение, ощущение (термическое — у змей) и слух. Время от времени животные прикладывают голову к земле, как бы уточняя, откуда исходят важные для него сигналы. Биологическое значение этих сигналов особенно важно в сумеречное время для ночных охотников. Эти факты можно истолковать и в том смысле, что движения жертвы вызывают низкочастотные механические колебания грунта, которые распространяются примерно на порядок быстрее, чем колебания в воздухе. Они-то и улавливаются виброрецепторами, локализованными в области органов слуха. Известно, что сетчатый ящурка питается личинками жука, которые зарыты примерно на глубине 4—6 см. Ящурка, прислушиваясь к шорохам, идущим из-под земли, делает раскопки, и в этих случаях уже можно не сомневаться, что местоположение личинки по ее шороху было определено точно. Змеи обладают двумя рецепторами исключительно высокой чувствительности — терморецепторами, улавливающими изменения температуры воздуха от приближения теплокровного животного на расстоянии 10—15 м, и механорецепторами, главным образом виброрецепторами, которые улавливают колебания почвы от ходьбы человека на расстоянии около 7 м. Что же касается истинного слуха, как это принято понимать применительно к человеку, то, по-видимому, в жизни змей он не играет существенной роли. Для них, в силу их экологии, жизненно важной является способность улавливать механические колебания субстрата, причем низкочастотные области спектра.

Распространенное среди любителей-натуралистов мнение, что в момент землетрясения змеи покидают свои убежища, выползая на поверхность, хотя и не имеет строгой научной документации, оставаясь пока народной молвой, имеет безусловно реальную основу. Давно известный так называемый «танец кобры» также разъясняет кое-что о природе этого явления. Как известно, игра на флейте или виолончели побуждает кобру «встать на дыбы» и производить некоторые ритмичные движения, наподобие танца. Однако, как оказалось, этот феномен имеет место лишь в том случае, если звучащий инструмент касается ящика, в котором находится кобра. Без такого контакта звучание инстру-

мента эффекта не вызывает. И еще одна деталь этого феномена: наилучший эффект от действия звучащих инструментов, приложенных к ящику, наблюдается при низких тонах, т. е. при низких частотах. Поверхность тела змей, вероятно, весьма чувствительна к механическому раздражителю. Слепленным змеям наносили слабые тактильные раздражения. Оказалось, достаточно падения головки мака, чтобы вызвать агрессивную реакцию животного.

## Птицы

Мы уже видели, что животные различных таксономических групп в соответствии с особенностями их образа жизни, биологии и с их экологией приобретают характерный для них рецепторный аппарат. Для птиц самой существенной особенностью их биологии является полет, их жизнь в воздухе. Завоевание воздушного пространства повлекло за собой необходимость быстрой ориентации в нем, оценки положения своего тела по отношению к вектору гравитации, регулировки скорости полета, управления полетом и др. Освоение воздушной среды стало мощным фактором развития двух видов рецепции: зрительной и механической. К последнему виду относятся главным образом слуховая и проприоцептивная рецепции.

Акт полета повлек за собой, вместе с совершенствованием механорецепции мышц, также их функциональную и биохимическую перестройку. Для обеспечения энергетически дорогостоящего полета у птиц (равно как и у насекомых) появились красные мышцы с преобладанием аэробного гликолиза, использующие более высокий энергетический источник — жир. Птица в полете расходует энергии до 200 кал · г/ч. Некоторые насекомые, дающие тысячу взмахов крыльев в секунду, расходуют до 500 кал · г/ч. К сожалению, насколько нам известно, данных о сравнительных морфологических исследованиях механорецепторов птиц крайне мало. Считают, например, что структура чувствительных телец в коже птиц и млекопитающих одинакова, различия касаются лишь их локализации.

Рассмотрим некоторые факты, касающиеся чувствительности и биологической роли механорецепторов птиц. При исследовании формирования рефлекторной

деятельности грачат можно видеть, как на легкие сотрясения гнезда птенцы моментально вытягивают шею и раскрывают рот, готовясь к принятию корма. Эти механические колебания гнезда и взмах крыльев самца или самки — в зависимости от того, кто кормит, — при посадке, равно как и звук «кра», уже в раннем возрасте оцениваются избирательно: подобной реакции не наблюдается ни на сильное качание гнезда ветром, ни на другие звуки.

В эмбриогенезе реакция органов на механические колебания появляется на ранних стадиях, еще до появления в них окончаний двигательных нервов. В эмбрионе цыпленка обнаруживается спонтанная двигательная активность головы и конечностей на 5—7-е сутки развития. При действии на зародыш звука или вибрации вначале обнаруживается торможение спонтанной двигательной активности, затем она отчетливо стимулируется. Уже и в эти сроки эмбриогенеза обнаружена дифференциальная чувствительность к вибрации и к различным частотам звука. Так, при частоте звука 100 Гц активность тормозится с 5 до 14 сут развития зародыша. Судя по абсолютным величинам времени спонтанных колебаний, звук частотой 1000 Гц заметного эффекта стимуляции не вызывает, тогда как при частоте 300 Гц активность достоверно понижается, а начиная с 12-х суток и далее — значительно повышается. Следует оговориться, что в этой постановке эксперимента влияние нервной системы полностью исключить невозможно. Хотя двигательные нервные окончания вырастают у цыпленка лишь на 12-е сутки, тактильные рецепторы появляются уже на 7—8-е сутки. Единственно, что не подлежит сомнению, это наличие у эмбриона чувствительности к звуку вибрации и, хотя пока еще несовершенной, но уже имеющейся, способности дифференцировать колебания. В более поздний эмбриогенез цыпленка, именно перед вылуплением, чувствительность к звуковым сигналам, по-видимому, уже приобретает некоторое биологическое значение. Так, если яйца японского перепела на 15-е сутки их инкубации подвергнуть действию звука, схожего с писком цыпленка, частотой от 1.5 до 60 Гц, то срок инкубации заметно сокращается, ускоряется вылупление птенцов. Если применить частоту звука от 60 до 500 Гц, то, наоборот, вылупление цыпленка замедляется. Трудно

объяснить столь удивительный факт влияния звука определенной частоты и интенсивности на процесс развития птенца. Это лишь показывает ограниченность наших знаний об интимной связи жизненных процессов с окружающими звуками.

Во взрослом состоянии птицы воспринимают звук и вибрацию по разным каналам. При исследовании восприятия звука и вибрации у снегирей было показано, что удаление органа слуха не лишает особь возможности воспринимать вибрацию налета, причем оптимальная частота восприятия — 400 Гц — сохраняется. При длительной тренировке порог восприятия вибрации при этих условиях понижается, тогда как звук по-прежнему не воспринимается. Чувствительность к вибрации у птиц намного (до двух порядков) выше, чем чувствительность пальцев человека. Исследования показали, что рецептором вибрации у кур и голубей является саккулюс. Так, уже 15-минутная вибрация саккулюса приводит к резким цитохимическим изменениям, в особенности в центральной зоне саккулюса: размеры ядер увеличиваются, хроматин концентрируется в крупные зерна, в рецепторных клетках снижается содержание РНК, падает содержание белка; митохондрии становятся светлее, ядрышки клеток перемещаются к периферии клетки и плотно прилегают к ядерной мембране. При других воздействиях, например гравитационных, подобных изменений не наблюдается.

### **Млекопитающие и человек**

Эти представители животного царства являются последним (новейшим) творением эволюционного процесса. Процветание данного крупного таксона во многом обязано развитию мощной системы механорецепторов. Наряду с кожными рецепторами (тактильными, вибрационными, рецепторами давления и проприоцепторами) оформились специализированные механорецепторы основных функциональных систем — сосудистой, дыхательной, пищеварительной и мочеполовой.

Морфологически механорецепторы различных систем имеют между собой значительные различия. Кожные рецепторы представлены тельцами Пачини, мейснеровскими телами, колбами Краузе, меркелевскими

клетками, а также свободными интраэпителиальными образованиями. Рецепторы внутренних органов и вообще весь класс interoцепторов необычайно разнообразный по структуре своих терминалей. Их названия определяют внешним сходством с привычными для человека картинками: чашечковидные, дисковидные, сетевидные, кустиковидные, грушевидные, палочковидные и многие другие. За всем этим многообразием внешних форм и рецепторов до сих пор не найдено никакого функционального эквивалента. Несомненно лишь, что их разнообразие и их количество на единицу площади зависят от интенсивной деятельности иннервируемого органа. Наиболее рациональную их классификацию, в которой морфологический признак отражает степень функциональной значимости рецепторной единицы, предложил Б. И. Лаврентьев в 1948 г. Этот ученый все рецепторы делит на две группы: свободно оканчивающиеся и несвободно оканчивающиеся. В этой удивительно простой классификации заложен глубокий смысл. Рецепторы со свободным окончанием во множестве рассеяны всюду как на поверхности тела, так и во внутренних органах. Они являются анализаторами, если так можно сказать, «общей ситуации», «общего гомеостаза», давая оценку окружающей среды — температуры, влажности, давления и др. Вероятно, рецепторы со свободными окончаниями по своим функциональным характеристикам являются по преимуществу поливалентными. Во всяком случае до сих пор не удается найти какого-либо различия среди этих рецепторов: какой из них специализирован для восприятия контактов с твердыми предметами, разности температур, действия химических агентов и др.

Поливалентность свойственна именно рецепторам со свободным окончанием. Их значение в том, чтобы непрерывно информировать организм об изменениях в окружающей среде, держать систему в тонусе, непрерывно поддерживать уровень возбужденности. В этом их отличие от высокоспециализированных рецепторов, избирательно воспринимающих лишь один вид энергии, например свет, звук, вибрацию, гравитацию. Все высокоспециализированные рецепторы относятся к группе рецепторов с несвободным окончанием. Общим для них является наличие дополнительной структуры, на которой оканчиваются терминали чувствительных нейронов.

Эта дополнительная структура и является наиболее чувствительной частью рецептора, настроенного на восприятие лишь одного вида энергии. С нервной системой эту дополнительную структуру роднит общность происхождения: обе ткани являются производными эпидермального зачатка, развиваются они в тесном контакте меж собой. Все виды дифференцированной нервной ткани, т. е. все конечные ее структуры, свойственные данному виду животного, сопровождаются глиальными элементами. Насколько теперь известно, наличие глии прослеживается на протяжении всей эволюции животного царства, начиная с того периода, когда появляется более или менее обособленная нервная система.

На современном уровне наших знаний о биологической роли нервной системы в общем виде дело можно представить так: возложенная на нервную систему интегрирующая роль не может быть выполнена ею без дополнительной ткани, специально ее обслуживающей. Вероятно, невозможно наделить одну и ту же клетку (нейрон) способностью контролировать: постоянство среды, гомеостаз подчиненных ей тканей, в том числе собственный гомеостаз, выполнять сигнальную роль, координировать функции других тканей (без помощи дополнительных структур). Для лучшего решения этой проблемы природа сочла целесообразным часть функций нейрона передать вспомогательным структурам — глиальным образованиям.<sup>1</sup>

Действительно, структура первично чувствующих клеток механорецепторов — глиального происхождения; оболочки нейронов и их проводников представлены швановскими клетками и их производными, имеют глиальную природу и обеспечивают оптимальные условия проводимости. Микроглиальные клетки — сателлиты — представляют собой неизменные спутники нервных клеток и, по-видимому, обеспечивают нейрон энергетическими ресурсами. И наконец, что в данном случае имеет для нас особое значение, дополнительные структуры механорецепторов в виде телец Пачини, Маркеля, Гербста (у птиц), клеток Мейснера, Гольца и дру-

---

<sup>1</sup> Аналогичное явление в эволюции произошло с мышцей — по мере усложнения ее функций в ней появились дополнительные структуры — мышечные веретена.

гие также являются производными глии. Эти дополнительные структуры и обеспечивают максимально возможную чувствительность к тому или иному виду раздражения.

Остановимся на морфофункциональной характеристике лишь одного механорецептора, который, как нам кажется, является вершиной творчества природы в создании анализаторов внешней среды.

Из всех известных механорецепторов с несвободным окончанием или, как их называют, инкапсулированных телец, — наиболее сложно устроенными являются тельца Фатер—Пачини (ТФП). Естественно, что сложность биологических структур отражает сложность выполняемых ими функций. Следовательно, уже априори можно предполагать наличие специфических для данного рецептора функций, рассматривая его роль как посредника между внешним миром и корковым центром. Со времени открытия ТФП (1840 г.) на протяжении всего полуторастолетнего периода это образование было предметом постоянного внимания биологов. Долгое время значение ТФП в организме оставалось неизвестным. Сам Пачини приписывал им роль животного магнетизма. Истинная их природа была понята лишь в 1920-х годах учеными Е. Эдрианом и К. Умрашем благодаря впервые примененному ими электрофизиологическому методу. Авторы обратили внимание на удивительные свойства телец: оптимальным в возникновении импульсной активности является переменное, а не постоянное давление. Однако всесторонние исследования структуры и функции этого образования выполнены лишь в последние 15—20 лет советскими учеными, главным образом в школе академика В. Н. Черниговского.

Схематически структура ТФП представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, ТФП состоит из трех структурных образований разной природы (1). Внешняя, многослойная капсула, спиралеобразно опоясанная коллагеновыми волокнами (2). В центре капсулы расположена так называемая внутренняя колба эллипсоидной формы, образованная клетками глиальной природы (3). Нервное волокно с характерным для него окончанием, входящим внутрь колбы. Такова в общем виде внешняя картина ТФП. Отметим некоторые детали ее, невидимые на рисунке. Слои внешней капсулы,

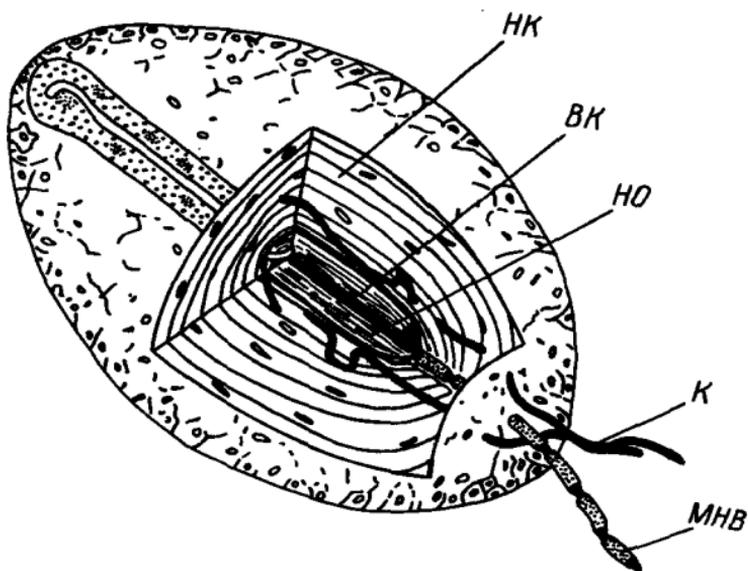


Рис. 2. Схематическое объемное строение телец Пачини. НК — наружная капсула, ВК — внутренняя капсула, НО — немиелинизированное нервное волокно, МНВ — миелинизированное нервное волокно, К — капилляры.

расположенные ближе к центру (к колбе и нервному волокну), значительно более плотные, чем поверхностные. Промежутки между слоями заполнены жидкостью. Как внутрь капсулы, так и внутрь колбы входят капилляры, а также отростки глиальных клеток, которые контактируют с основным нервным волокном. Нетрудно видеть, что вся сложная структура формируется вокруг нервного окончания.

Какую биологическую службу несет дополнительная структура рецептора? Этот вопрос наиболее полно освещен в работах В. Н. Черниговского и его учеников. Не вдаваясь в детали, отметим лишь основные выводы, касающиеся биологической роли указанных структур ТФП: 1) вокруг нервного волокна устанавливается определенный фон возбудимости; 2) возбуждение, возникшее в дополнительной структуре, передается на нерв; 3) дополнительная структура при определенных условиях становится резонатором, усиливая степень возбуждения; 4) дополнительные структуры обеспечивают адаптивный процесс. Мы еще не знаем многих тайн механизма передачи информации о мире, окружающем человека, которую осуществляет этот высокоорганизованный рецептор. Нам не понятен механизм

формирования потока импульсов, постоянно идущих к корковым центрам, не ясна характеристика этих импульсов. Но физиологам уже ясно, что работа этого рецептора осуществляется не по принципу «все или ничего». В центр поступают не однотипные импульсы спайкового потенциала, а импульсы, несущие многостороннюю информацию о внешнем мире.

По мнению академика В. Н. Черниговского, рецепторы — это не только и не просто воспринимающие аппараты, а поистине *творческая часть афферентного отдела кортиковисцеральной рефлекторной дуги*. Понятно поэтому, что их число на единицу площади особенно велико в тех участках тела, которые более всего контактируют с внешним миром: кончики пальцев рук человека, ладонная поверхность, стопа. Понятно также, что ТФП обладают высокой чувствительностью по сравнению с другими механорецепторами. Так, порог чувствительности по амплитуде колебаний составляет 0.5—1.0 мкм. По сравнению с чувствительностью других механорецепторов того же организма у ТФП он выше на 1—2 порядка. И еще особенность, характерная для ТФП — это вращение в капсулу дополнительных нервных волокон. Дополнительные нервные волокна появляются в генезе значительно позже того, как тельца уже сформированы. К сожалению, до сих пор не выяснена не только роль дополнительной иннервации, но и ее природа: являются ли эти нервные веточки частью чувствительных нейронов спинальных ганглий или имеют иное происхождение, например являясь ветками симпатического ганглия — как контроль вегетативной нервной системы.

Какова дальнейшая тенденция в эволюции механорецепторов? Вероятно, основной тенденцией в эволюции рецепторов является увеличение их числа на единицу площади и повышение их чувствительности. Механорецепторы млекопитающих и человека, как и других высших животных (например, насекомых), взяли под свой контроль все процессы жизнедеятельности организма: анализ окружающей среды с помощью дистантного слухового рецептора, контакт с окружающей средой, но, пожалуй, наиболее жизненно важным является обеспечение чувствительной иннервации (рецепции) внутренней среды организма. Как показали многочисленные исследования, все участки сердечно-сосудистой

системы, пищеварительный тракт, внутренние органы, мышцы, оболочки мозга, суставы, связки — все пронизано чувствительной иннервацией, преимущественно механорецепторной. Каков биологический смысл столь интенсивного наращивания внутренней иннервации — интероцепторов? Вероятно, жизнеобеспечение организма в большей степени зависит от деятельности внутренних органов и их иннервации. Экстероцепторы и их исключительно высокая чувствительность несомненно играли и играют важнейшую роль в борьбе за существование, но не им принадлежит кардинальная роль в текущей жизни организма. Лишение зрения или слуха не является роковым для жизни особи, тогда как выключение, например, рецептора сердечно-сосудистой системы несомненно может стать роковым для организма.

Даже беглый обзор морфологических и функциональных характеристик механорецепторов животного мира позволяет отметить в процессе эволюции тенденции всестороннего анализа действия различных видов механической энергии: давления, гравитации, звуковых и инфразвуковых колебаний. Потребность в оценке действия механической энергии увеличивалась с усложнением организации живых существ. В связи с этим и в развитии рецепторного аппарата произошла дивергенция. Наряду с необходимостью рецепции действия механической энергии окружающего мира возникла не менее настоятельная необходимость оценить внутренний мир организма: импульсацию жидкости, натяжение мышц, работу сердца, легких, желудка. Иными словами, наряду с экстероцепторами возникла густая сеть интероцепторов, включая так называемый рецептор мышечного чувства — проприоцепторы.

Данные о чувствительности животных различных уровней эволюции — от простейших до человека, наличие бесчисленного множества специальных рецепторов, воспринимающих звук и вибрацию, и исключительно высокая их чувствительность подтверждают идею И. М. Сеченова, что «внешняя среда является составной частью того, что мы называем жизнью».

Как мы видели, уже у простейших появляются структуры, более чувствительные к механическим колебаниям. По мере развития животного мира структуры, воспринимающие этот вид энергии, все более усложнялись и их способность улавливать и дифференцировать эти колебания достигла предела физической возможности. Из самого факта существования во всем животном царстве механорецепторов следует вывод, что звук и вибрация, как механический фактор окружающей среды, несут важную биологическую функцию, от действия которой зависит биологическая судьба организма. В чем заключается эта биологическая роль звука и вибрации? Конечно, человеку более привычно и понятно видеть в таком физическом факторе окружающей среды, как звук, лишь средство общения, фактор, дающий возможность выражать мысли, чувства, эмоции. Однако следует сказать, что эта видимая, повседневно наблюдаемая роль звука является вторичной, она приобретена животным миром на более поздних этапах эволюции. Ясно, что ни о какой сигнализации (звуковой) не может быть и речи не только у простейших, но и у животных более высокого уровня организации (например, кишечнорастворимые, черви и др.). Однако нет никаких оснований допускать, что звук не играет никакой биологической роли даже в простейших комочках зарождающейся жизни. Эта первородная функция механических колебаний скрыта от нас давностью лет, как и многое другое, забытое человеком и животными, далеко ушедшими от своей биологической юности. Не одно научное любопытство, но и сугубо прагматические цели вынуждают ученых «вспоминать» и оценить эту первичную функцию механических колебаний. В чем она заключается?

По нашему мнению, при истоках зарождения жизни механические колебания участвовали в создании биологических структур. Экспериментальные исследования по этому вопросу нам неизвестны — их нет! И мы вынуждены ограничиться лишь логическими доводами. Хорошо известно, что механические колебания являются постоянно действующим фактором на нашей планете и наблюдаются во всех сферах. Интенсивность этих колебаний меняется в широком диапазоне, от едва

уловимых человеческим ухом ( $10^{-14}$  Вт/см<sup>2</sup>) до интенсивностей, способных разрушать крепости. Биологические структуры возникали независимо от этих факторов, однако сохранились те из них, конструкция которых обеспечивала устойчивость против разрушительного действия механических колебаний. Подобно тому как птицы методом проб и ошибок научились строить гнезда, устойчивые против разрушительного действия механических колебаний, так и природа, пользуясь этим методом, в процессе эволюции создала механически устойчивые биологические структуры. Трудно представить, чтобы эти структуры формировались без учета действия механических колебаний, игнорируя их разрушительную силу. Скорее, следует признать, что механические колебания были и конструкторами, и контролерами биологических структур. По выражению И. М. Сеченова, они вошли составной частью в субстанцию *жизнь*. Это и есть изначальная, первичная роль механических колебаний в формировании структур живой материи. Далее, следует признать, что именно механические колебания, как постоянно действующий фактор, несущий определенные биологические функции, вызвали к жизни высокочувствительные образования — механорецепторы.

Нельзя считать случайным тот факт, что у всех одноклеточных животных имеются структуры с повышенной чувствительностью к механическим колебаниям и способные к сокращению. Это еще не мышцы с их сложной гетерогенной структурой, собственными чувствительными аппаратами, но это структура, функция которой, так же как и мышцы, способна генерировать механическую энергию. Речь идет о внутриклеточных структурах типа мионем, фибрилл, нитей. Каково значение этих структур в клетке? Вероятно, их роль в жизни клетки двояка: несомненно, они более чувствительны к механическим колебаниям, чем другие клеточные образования. Следовательно, они выполняют роль рецепторов. Но они к тому же и сокращаются, а внутриклеточные сокращения обеспечивают различного рода физико-химические процессы: своеобразный ионный насос, перемешивание, изменение проницаемости. Следовательно, они участвуют в осуществлении метаболических процессов, обеспечивают их нормальное течение. И действительно, все исследованные до сих пор пред-

ставители простейших имеют сократительные структуры, которые обладают не только повышенной чувствительностью, но и дифференциальной чувствительностью к различным частотам механических колебаний.

Интересно, что дальнейшее повышение чувствительности к механическим колебаниям обеспечивается появлением нервных элементов. Таким образом, для появления в эволюции механорецепторов еще недостаточно того, что механические колебания являются постоянно действующим фактором окружающей среды. Надо, чтобы этот фактор нес определенную биологическую службу, иначе появление высокочувствительных механорецепторов не будет оправдано. Они будут биологически бесполезны.

Множественность биологических функций, которые выполняют механические колебания, не должна нас удивлять, ибо это явление наблюдается и на других рецепторах. Так, например, зрительный рецептор не мог появиться в эволюции, если бы живая материя была инертна к свету. Несомненно, свет также нес службу, связанную с метаболизмом. Это — первородная функция света. И теперь свет несет двойную службу: экологическую (популяционную), с помощью дистантного зрительного рецептора, и метаболическую (обменную).

Еще более очевидна двоякая служба терморепциации. Первичная роль термического фактора связана с процессом метаболизма и не нуждается в доказательствах. Здесь хотелось бы подчеркнуть, что связь термического фактора с механическим в метаболических процессах более глубокая, чем это может показаться с первого взгляда. Она определяется их физическим родством. Как известно, теплота есть функция движения (колебания частиц). Но именно движение частиц вызывается и механическими колебаниями. Интересно, что в обоих случаях имеется оптимум и пессимум интенсивности их биологического действия.

Приведем несколько примеров того, что мы называем первичным действием механических колебаний звукового диапазона частот. В нашей лаборатории при исследовании действия вибрации с частотой 100 Гц и ускорением в 5 g на изолированную мышцу было обнаружено резкое повышение ее резистентности к повышенной температуре (рис. 3). Этот факт дает основа-

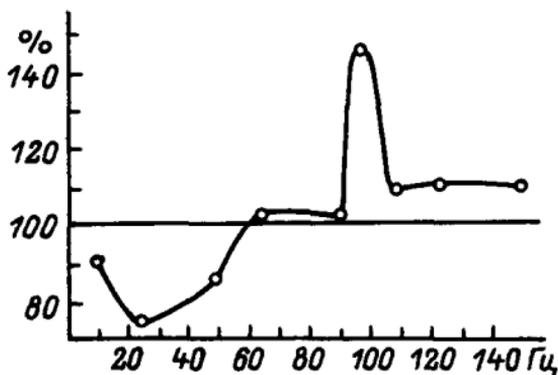


Рис. 3. Изменение резистентности мышцы крысы к повышенной температуре в зависимости от частоты вибрации.

По оси абсцисс — частота вибрации (Гц), по оси ординат — время выживания (% к контролю).

ние сделать далеко идущие выводы о биологической роли механических колебаний. Вторым примером, исследованиями, проведенными на инфузориях, было показано, что одна из большого диапазона частот, именно 3000 Гц (это частота, близкая к оптимуму частот, воспринимаемых человеческим ухом), резко повышает активность инфузории в заглатывании пищи; другие частоты, наоборот, резко подавляют эту активность. Следовательно, у особи есть физиологическое основание выбора оптимальных частот. Третий пример: В опытах, проведенных на коловратках, показано, что вибрация особи с частотой 700 Гц и с ускорением 10 g увеличивает плодовитость на 230 %!

В экспериментах на коловратках было обнаружено два исключительно интересных явления: во-первых, можно было предполагать, что способность репродуктивного аппарата задана генетически. Однако, как оказалось, она закреплена не столь жестко, внешние факторы в значительной степени могут ее изменить. Во-вторых, выяснилось, что механические колебания способны оказывать свое действие на самые фундаментальные процессы жизнедеятельности особи, на судьбу популяции. При других условиях вибрации по частоте и интенсивности плодовитость столь же резко подавляется. Эти примеры являются центральными в доказательстве биологически необходимого (именно необходимого) действия механических колебаний.

Здесь уместно будет поставить еще один вопрос, касающийся частотной характеристики биологически значимых колебаний — вибрации и звука. Опыты и наблюдения показывают, что биологические структуры, будь то целый организм, клетки или ткани, реагируют на частоты низкой и крайне ограниченной области спектра (см. рис. 1). Вибрация вызывает те или иные морфофизиологические изменения в организме или в его тканях при частотах порядка от одного до нескольких тысяч герц. В большинстве экспериментальных данных этот спектр сужают еще более, примерно от 15 до 1000 Гц. Воспринимаемые органами слуха частоты несколько выше, например оптимум звуковых частот для человека 2500—3000 Гц. У других высших животных, например у дельфинов, летучих мышей, звуковые сигналы занимают ближайшую ультразвуковую область спектра (60—100 кГц).

Естественно, возникает вопрос: почему из бесконечного частотного спектра вибрации и звука биологически значимой оказалась именно эта область? Едва ли сейчас без специальных исследований возможен исчерпывающий ответ. Теперь мы уже хорошо знаем, что звук и вибрация с частотами от 10 до 2—3 тыс. Гц оказывает определенное биологическое действие на объекты всех уровней эволюционного развития: субклеточные структуры, клетки, ткани и организмы. Но мы почти ничего не знаем о биологическом действии колебаний с частотами, например, много ниже 10 Гц — инфразвука. Существует лишь предположение, что число автомобильных катастроф, выходов на работу по болезни, сердечных заболеваний на континенте, в тысячах миль от бушующего шторма в океане, связано с возникающим при штормах инфразвуком. По мнению академика В. В. Шулейкина именно инфразвук является предвестником штормов.

Еще меньше мы знаем о биологическом действии ультразвуковых частот порядка миллионов герц или, например, о биологическом действии космических явлений на рост биомассы, на численность популяций, на физиологические процессы и др. Ответ на поставленный вопрос может быть дан лишь в качестве предположения. Поставим вначале аналогичный вопрос, касающийся температуры. Почему для всего живот-

ного мира на Земле граница оптимальных температур находится в пределах очень узкой шкалы, примерно от 0 до 45 °С? Вероятно, эта область температур является оптимальной для протекания физико-химических реакций, обеспечивающих нормальное течение биологических процессов. В случае, касающемся температуры, это предположение доступно экспериментальной проверке. Отвечая на вопрос: почему животный мир «избрал» указанные выше частоты звуковых колебаний, в общем виде можно ответить, что действие звука и вибрации именно этих частот является оптимальным для протекания биологических реакций. Доказательством этого могут служить приведенные выше данные, в которых показано, что вибрация с частотой 100 Гц повышает резистентность мышц, увеличивает скорость белкового синтеза. Эти и другие сведения подтверждают наличие оптимума частот. Это те частоты, которые участвовали в формировании биологических структур, которые и реагируют избирательно на эти частоты колебаний. Частоты других областей спектра, вероятно, также производят биологическое действие, но через другой уровень организации: молекулярный и, возможно, атомный.

### **БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ СЛЫШИМОГО ЗВУКА**

До сих пор, оценивая биологические действия механических колебаний, мы специально не выделяли диапазон слышимого звука, полагая, что физическая природа вибрации и звука одна и та же. Однако в механизме биологического действия между ними имеются существенные различия. В связи с этим мы сочли целесообразным детальнее рассмотреть биологическое значение слышимого звука. Роль звука в жизни животных и человека является предметом многочисленных и интенсивных исследований. В сводках дано современное представление о механизме генерации и восприятия звуковых сигналов, их значения в жизни животных. Ученые начинают расшифровывать язык звуков, его смысловое значение.

Однако некоторые принципиальные аспекты проблемы оставались как бы вне поля зрения биологов. Речь идет прежде всего о прямом действии слыши-

мого звука. Из того факта, что применительно к звуку, свету и температуре природа создала высокочувствительные приборы-приемники этих видов энергии, не следует, что другие (нерецепторные) клетки организма индифферентны к их действию. Также нет оснований считать, что клетки остаются индифферентными к тем видам энергии, для восприятия которых нет рецепторов (например, магнитные поля, радиация, ультразвук). Однако их действие является предметом интенсивных исследований. Особенно всесторонним исследованиям подвергается радиобиологическое действие на живые системы всех уровней организации. В последние два-три десятилетия интенсивно изучается биологическое действие электромагнитных полей и ультразвука. Что касается биологического действия слышимого звука, то при этом в первую очередь обращалось внимание на звук как на дистантный раздражитель, служащий средством коммуникации.

Другой аспект проблемы — прямое действие звука на рецепторные клетки, как и на любые другие клетки, — оставался вне поля зрения исследователей. Кажется странным, что с древнейших времен до середины XX в. пылкий ум человека не обратил внимания на элементарно простой вопрос: как действует звук на живую клетку? Лишь в конце 40-х—начале 50-х гг. появилась серия работ, результаты которых прямо отвечают на этот вопрос. Наука раскрыла новый мир интимных отношений живой материи с окружающей средой.

Честь этого открытия принадлежит Д. Н. Насонову — создателю школы советских цитологов. Как и всякое открытие, после его объяснения, становится явлением вроде бы само собой разумеющимся. При этом забывается сложность первоначального подхода к проблеме. В самом деле, кому бы могла прийти странная мысль выяснить, не «слышит» ли изолированная мышца лягушки или — и того более — не «слышит» ли белок, экстрагированный из этой мышцы? Причем слышит не вообще звук, как физический фактор, а именно звук диапазона частот, слышимых человеческим ухом. Казалось бы, нелепость этого вопроса вполне очевидна. Однако если подойти к нему с точки зрения эволюции рецептора звука, то эта мысль приобретает глубокий биологический смысл.

И действительно, чтобы в процессе эволюции воз-

ники высокочувствительные рецепторы звука, надо, чтобы клетки всех первичных организмов обладали чувствительностью к звуковым колебаниям, иначе будет непонятна причина появления механорецепторов в эволюции. Более того, надо, чтобы чувствительность первичных клеток соответствовала тем звуковым частотам, которые являются характерными именно для человеческого уха. Но такое проникновение в глубь эволюции свойственно лишь ученому-естествоиспытателю, способному предвидеть и предсказать явления, которые с первого взгляда кажутся маловероятными. Именно таким ученым и был Д. Н. Насонов. Пусть эти слова послужат, хотя и запоздалым, выражением благоговейной дани уважения учителю от ученика — автора этой книги.

Данные о реакциях клеток и тканей организма на действие слышимого звука будут подробно изложены во второй главе. Здесь нам хотелось подчеркнуть лишь ту мысль, что биологическое действие и биологическое значение слышимого звука вовсе не ограничиваются сигнальной ролью, а влияние его распространяется и на нерцепторные клетки, оказывая свое действие в процессе метаболизма.

И еще одно биологически важное свойство звука хотелось бы здесь подчеркнуть — механические колебания (в частности, звуковые) несут в себе ритмическую природу. В биологических системах ритмический процесс является фундаментальным их свойством. «Природа не терпит пустоты, но очень любит ритмы» (Ф. Гольдекер, 1964). Откуда эта любовь к ритмам? Хочется связать ее с организацией биологических структур.

Что значит *чувство ритма*? С физической точки зрения, любая конструкция обладает своей собственной (внутренней) частотой колебаний. В силу этого данная конструкция и обладает повышенной чувствительностью именно к этой частоте. Техническую конструкцию создает человек. Конструкции биологических структур создает природа с учетом постоянно действующих на них ритмов механических колебаний. Эти ритмы участвуют в конструировании тех или иных биологических структур и отзываются на подаваемые извне ритмические колебания; функциональное чувство ритма проявляется в изменении метаболической активности.

Это подтверждается и экспериментально. Так, в исследованиях, проведенных в нашей лаборатории на мышах, было показано, что вибрация звукового диапазона частот (70 Гц) резко, в среднем на 78.4 %, повышает включение предшественника белка —  $^3\text{H}$ -лейцина в клетки костного мозга (рис. 4).

Чувствительность к механическим колебаниям, вообще чувство ритма имеют огромное биологическое значение для организма в целом, в его взаимоотношениях с окружающим миром. Остановимся на одной стороне проблемы — на роли чувства ритма в общении людей, пораженных недугом — слепоглухонемых, — с окружающей средой. Десятки тысяч людей, поражены этим недугом. Многие дети страдают им и до конца жизни несут эту тяжкую участь. Наука начинает приобретать некоторые возможности оказывать обездоленным помощь в общении с внешним миром. Биологической основой этой помощи является чувство ритма.

Вот несколько примеров. Е. Келлер (1880 г. р.), слепоглухонемая, по свидетельству друга их семьи, Марка Твена, понимала содержание его речи, прикладывая руку к груди говорящего. Каким-то особым чувством она ощущала: приход посторонних, будучи в поле — шелест травы, светлое небо. Ольга Скороходова (1914 г. р.), слепоглухонемая, несомненно интеллектуально одаренная, занимается наукой, пишет стихи. Встречавшиеся с ней М. Горький, И. П. Павлов высоко отзывались о ее духовной одаренности. По ее

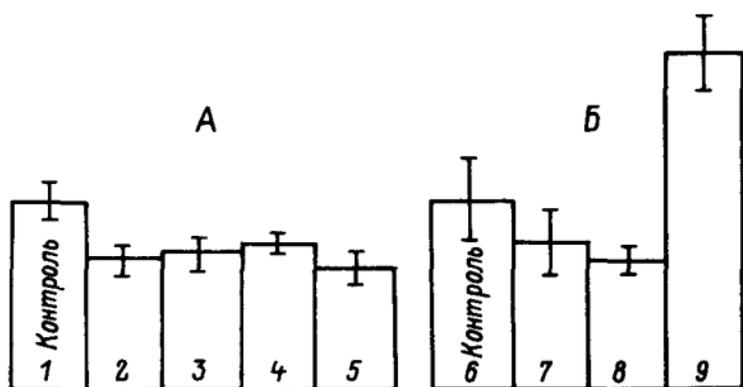


Рис. 4. Влияние вибрации на митотический индекс (А) и уровень включения меченого предшественника в кровяные клетки мыши (Б).

1 и 6 — контроль, 2 — 70, 3 — 200, 4 — 800, 5 — 1600 Гц, 7—9 — 70 Гц: 7 —  $^3\text{H}$ -тимидин, 8 —  $^3\text{H}$ -уридин, 9 —  $^3\text{H}$ -лейцин.

свидетельству, как у нее, так и у других лиц, страдающих этим недугом, высоко развито чувство ритма. Прикладывая руку к звучащему роялю, она не только «слышит», но и понимает содержание музыки. Повышенное чувство ритма наблюдается уже в детском возрасте. Чарльз Диккенс, посетивший приют глухонемых детей, наблюдал на лицах несчастных какое-то оживление, выражение чувства радости, когда исполнялась, вероятно, уже не раз слышимая ими мелодия. Удивительное явление наблюдал Ч. Дарвин. Слепоглухонемая Лаура Бриджман, получив приятное для нее известие (письмо), пришла в восторг, который выражался хлопаньем в ладоши, ритмическими движениями тела; лицо покрылось румянцем. Проявилась какая-то общебиологическая реакция организма, несмотря на отсутствие зрительных и слуховых рецепторов. Как могло возникнуть это движение рук — хлопанье в ладоши — если она никогда этого не наблюдала? Это одна из загадок биологии.

Нельзя не видеть, что в биологической природе организма существует какой-то механизм компенсации утраченных функций: отсутствие, например, зрительной функции компенсируется функцией механорецепторов.

О наличии такой компенсации имеются и гистологические данные. Еще в 1953 г. А. А. Отелин установил, что у слепых количество механорецепторов (телец Пачини) намного больше, чем у зрячих. Так, в одном случае у слепого мужчины в возрасте 51 г. на правой руке было 2440 телец Пачини. Разница в количестве рецепторов наблюдается между правой и левой рукой. У слепого музыканта 22 лет на правой руке было 3641, а на левой 2870 рецепторов. Но как мы теперь знаем, наблюдается не только увеличение числа рецепторов, но и резкое повышение их чувствительности при утрате зрения.

По поводу компенсации функции И. М. Сеченов писал: «Рука не есть только хватательное орудие. Ладонная поверхность руки, подобно сетчатке глаза, дает сознанию форму предмета; слепой читает по выпуклым буквам рукой. . . Зрячий избалован зрением в деле познания формы, величины, положения и передвижения окружающих его предметов, поэтому не развивает драгоценные способности руки давать ему те же самые показания; слепой к этому вынужден, и у него чувству-

ющая рука является действительно заменителем видящего глаза». <sup>1</sup>

Все стройное учение Введенского—Ухтомского об оптимуме и пессимуме частот раздражений нервных элементов и мышц, учение об усвоении ритма свидетельствуют о глубокой связи физиологических ритмов с ритмами внешней среды. Эти связи уходят к истокам зарождения жизни на Земле. Ритмические колебания внешней среды формировали биологические структуры и стимулировали метаболические процессы. Эта первородная чувствительность к механическим колебаниям сохранилась на протяжении всей эволюции и является важной составной частью всего ансамбля биологических процессов. К сожалению, мы не знаем ни механизмов, ни тех физиологических, психологических и общебиологических последствий действия звуковых (особенно музыкальных) ритмов.

Мы уже говорили об оптимуме частот для нервных и мышечных элементов, действие которых, как надо полагать, биологически целесообразно. Отмечали также, что все биологические процессы в организме протекают в определенном ритме. Ритм — это один из фундаментальных принципов биологических процессов. Нет ничего удивительного в том, что ритмы, задаваемые извне, могут включаться в соответствующие ритмы в биологических процессах. Не случайно, что язык ритмов понятен многим животным и, конечно же, людям всех народов, племен и цивилизаций, понятен потому, что в его основе лежат ритмы биологических процессов. Не случайно также, что все дикие племена имели свои гимны как боевой клич, выражаемый через ритмы звуков; с древнейших времен народные ритуалы также сопровождалась ритмами звуков. О ритмах музыки мы можем сказать лишь общеизвестные истины, что они приобрели могучую власть над душевным миром человека, способны вызвать чувство любви, гнева, грусти и радости, отвагу и мужество.

### **БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПОТРЕБНОСТЬ В ЗВУКОВЫХ РАЗДРАЖИТЕЛЯХ**

До сих пор мы приводили доказательства биологической значимости действия звука на живые объекты — что это действие сопровождается интенсификацией или,

<sup>1</sup> И. М. Сеченов. Собр. соч. 1952. Т. 1. С. 523.

напротив, торможением метаболических процессов. Приведем теперь пример биологических последствий отсутствия действия звука. В 30-х гг. И. П. Павлов, исследуя высшую нервную деятельность методом условных рефлексов, предпринял попытку выяснить роль внешних факторов, в частности звука, на высшую нервную деятельность. Эти исследования проводились в так называемой «башне молчания», куда не проникали никакие внешние звуки.

Впервые в истории науки Павлову удалось наблюдать удивительное явление: не наличие, а отсутствие звуковых раздражений нарушает нервную деятельность, ее активность затухает, преобладает тормозная реакция. Вывод Павлова заключается в том, что окружающие условия, в том числе и звук, являются необходимым элементом жизненного стереотипа. Для человека этот привычный стереотип оказывается особенно важным, так как он по существу составляет эволюционно сложившуюся сферу его психической деятельности.

Насколько нам известно, специальных исследований роли слышимого звука в психической жизни нет. Есть лишь частные наблюдения. Так, люди пожилого возраста просыпаются от того, что перестают тикать часы, если, конечно, они были многолетним спутником их жизни. Часто человек как-то вдруг остро ощущает тишину. Отсутствие постоянно действующих звуков становится раздражителем. Не лишено глубокого смысла и обратное явление — психический настрой на возможность звука. Никто не может сравниться по чуткости с матерью к плачу своего ребенка. У матери формируется некий сторожевой пункт, способный улавливать малейшие звуковые колебания, исходящие от ее ребенка. Во всех этих случаях речь идет о биологической роли звука, связанной с психической жизнью человека.

В связи с этим нельзя пройти мимо одного из позорнейших для человека явлений не столь уже отдаленного прошлого. Речь идет о сатанинской идее — наказывать человека, заключая его в каменный мешок. Какой же «могучий интеллект» мог додуматься до столь страшного наказания? Поистине, разум одинаково велик в сотворении и добра, и зла. Фауст и Мефистофель равны в своих победах. Костров инквизиции оказался недостаточно для устрашения могучего и мятежного духа истинного Человека. Потребовались еще

каменные мешки. В летописи прошлого сохранилось множество примеров, как и чем заканчивалась жизнь узника каменного мешка. У человека изъят один из положительных раздражителей — звуковой фон, который был постоянным его спутником, постоянно действующим компонентом в формировании психического мира. Лишение этого компонента исключает нормальное существование человека.

Мы довольно подробно остановились на вопросе о чувствительности живой материи к механическим колебаниям среды — звуку и вибрациям. Основной материал касается реакции клеток, тканей и целых организмов животных различных уровней организации к вибрациям и звуку слышимой области частотного спектра. Так, для человеческого уха диапазон воспринимаемых звуковых частот составляет от 10—16 до 20 000 Гц. Звук выше и ниже этих частот человек не воспринимает. Удивительным является тот факт, что во всем огромном мире животных нашей планеты диапазон частот, воспринимаемых особями, не выходит далеко за пределы частот слышимого человеком звука, находясь в пределах 1—100 кГц.

В данной главе, однако, речь шла не только о чувствительности органов слуха, но в большей степени о действии звука и вибрации на биологические объекты, о их взаимодействии независимо от наличия или отсутствия органов слуха. Дело в том, что отсутствие рецепторов (органов слуха), например к ультра- или инфразвуку, не означает, что механические колебания этих частот не действуют на живые объекты, что клетки тканей организма к их действию индифферентны. А из того факта, что орган слуха воспринимает звуковые частоты, например у человека максимум 2500—3000 Гц, также не следует, что (другие) нерцепторные клетки к этому звуку индифферентны.

В связи с этим мы считаем целесообразным различать первичное и вторичное биологическое действие механических колебаний. Первичное действие, или, лучше сказать, взаимодействие звука с живым объектом, не связано с органами слуха. Первородные биологические функции звука и вибрации проявляются в формировании биологических структур, в их метаболизме, в формировании высокочувствительных механорецепторов. Следовательно, под влиянием механических коле-

баний формировались биологические структуры, их прочность к механическим воздействиям, осуществляется метаболизм этих начальных комочков жизни. Эта первичная роль механических колебаний лежит в основе зарождения жизни. Биологическая необходимость механических колебаний вызвала к жизни огромную сеть механорецепторов, по своему разнообразию и распространению несравнимую ни с какими другими рецепторами. Человек не всегда осознает тот факт, что звук, помимо органов слуха, действует, например, на его внутренние органы, на все клетки и ткани организма. Глубокий смысл афоризма «Глухонемых в большей степени надо защищать от шума, чем человека с нормальным слухом» — мало известен людям.

О биологической роли вибрации, о ее биологической значимости в индивидуальной жизни животного свидетельствует пока еще не получивший объяснения факт, что чувствительность белка (актомиозина) мышц к вибрации спонтанно меняется в различные сезоны года. Почему? Какой в этом биологический смысл? Еще в конце 60-х гг. было показано, что ферментативная активность актомиозина мышечных тканей спонтанно меняется в различные сезоны года (рис. 5, 6). Максимальная активность наблюдается в зимний период, точнее:

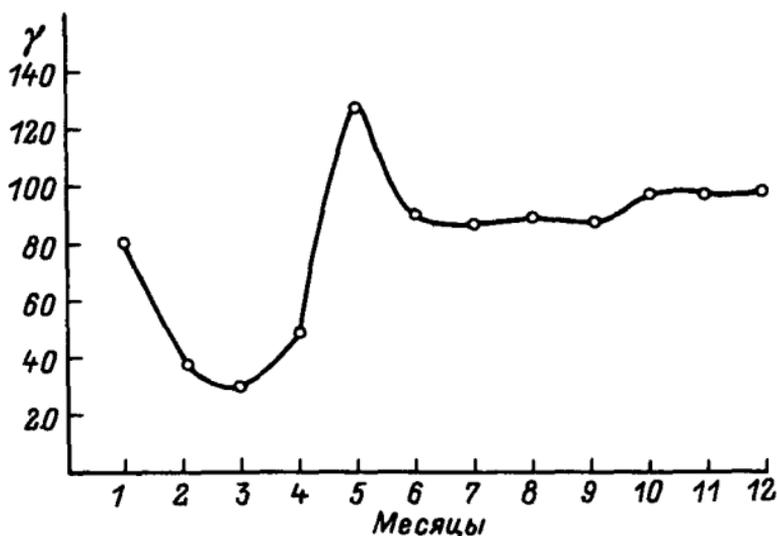


Рис. 5. Спонтанные изменения ферментативной активности актомиозина в различные сезоны года.

По оси абсцисс — месяц; по оси ординат — ферментативная активность (усл. ед.).

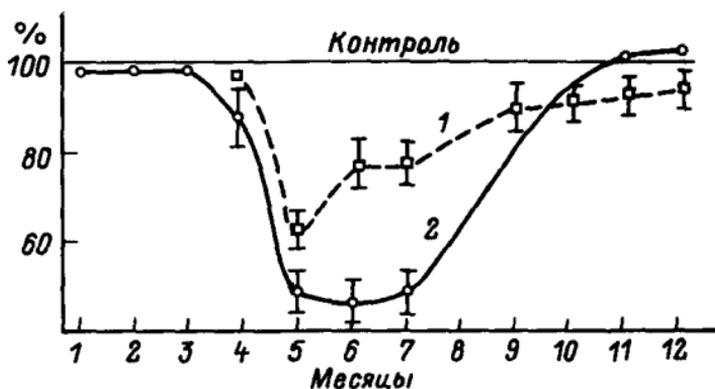


Рис. 6. Изменение чувствительности актомиозина к вибрации в различные сезоны года.

По оси абсцисс — месяц; по оси ординат — активность (% к контролю). 1 — вибрация с частотой 100 Гц, 2 — 200 Гц.

ноябрь, декабрь, январь. Наиболее низкая активность наблюдается: февраль, март, апрель. Исключением из всего годового периода оказался май месяц. Ферментативная активность в мае примерно в 2 раза выше, чем в другие периоды года. Наблюдаемые явления связываются с биологическими ритмами животного, а также с ритмами космической природы. Дальнейшие исследования показали, что именно в весенне-летний период — май, июнь, июль — актомиозин оказался наиболее чувствительным к вибрации, в особенности с частотой 200 Гц. Ферментативная активность белка высокая, а его резистентность к различным факторам, в том числе к вибрации, резко падает, чувствительность значительно повышена. Пока остается неясной интимная связь сезонных ритмов организма с чувствительностью к механическим колебаниям. Но эта связь очевидна. Биоритмы — изначальная форма существования жизни. Вероятно, чувствительность живого объекта к механическим колебаниям является одним из компонентов, составляющих биоритм.

Вторичное действие звука связано с его восприятием органами слуха. Биологическое значение этого действия определяется интересами сообщества (популяций, видов). Следует заметить, что в школе И. П. Павлова считают целесообразным и это вторичное действие разделять на два временных этапа — первичный и вторичный. На этом уровне эволюционного развития животных под влиянием звука возник и новый уровень

общения между особями; животные научились с помощью звука выражать состояние своего внутреннего мира, появилась возможность языка звуков и языка эмоций. Для человека звуки речи, музыки приобрели могучую власть над его духовным миром. Кроме чисто биологической звуки несут социальную службу. Всем понятен колокольный звон «в дни торжества и бед народных», набат несет тревогу людям, «вечерний звон» зовет к душевному покою и отдыху. Звуки, адресованные внутреннему миру человека, пробуждают в нем чувство любви к прекрасному, добрые чувства к людям, уводят от суеты мирской в мир грез. В таких звуках, как шум дубрав и шелест листвы, в звоне капли, журчанье ручьев, гомоне птиц слышится что-то родное, близкое. Может, они, эти звуки, приобщают нас к тому, что мы называем Родиной?

В первой главе мы стремились показать удивительную гармонию природы, созданную на Земле, гармонию жизни со средой, ее окружающей, гармонию человеческого бытия с миром звуков. Хочется заключить главу вопросом с чуть-чуть тревожной нотой: хватит ли у человека мудрости и мужества сохранить (хотя бы?!) эту дивную гармонию, которая до сих пор еще украшает чудесный уголок Вселенной — Землю.

## Глава 2. ВИБРАЦИЯ И ЗВУК — ИСТОЧНИКИ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

---

Проблема виброзащиты в широком понимании этого слова представляет собой проблему защиты окружающей нас среды и охраны природы, она имеет большое значение общегосударственного и международного масштаба.

Академик *И. И. Артоболевский*

На протяжении миллионов лет развития человеческого общества никогда, ни при одной цивилизации не возникало проблемы биологически опасного действия для человека звука и вибрации. Лишь грозные явления природы: громы, молнии, землетрясения, цунами и другие виды стихий, наводили на людей ужас своей мощью и таинственностью. И вот, спустя миллионы лет эволюции, впервые в XX в. возникла вполне реальная угроза биологическому благополучию человека от действия различных форм механической энергии (звук, вибрация и давление). Эту угрозу принесла современная цивилизация, ее научно-техническая революция. Социальный фактор нарушил веками складывавшиеся, жизненно необходимые взаимоотношения биологических процессов с действием механических факторов. Возникла био-социальная проблема, которую в общем виде можно сформулировать как проблему нарушения взаимоотношений биологических и социальных факторов в жизни человека. Социальный фактор все в большей степени стал определять конечный результат взаимодействия человека с окружающей средой. Именно социальный фактор породил условия, при которых звук и вибрация становятся источником патологии, угрожая не только здоровью людей, но, что более опасно, биологической судьбе последующих поколений.

В данной главе мы рассмотрим различные формы и виды патологии, вызываемые звуком и вибрацией, которые являются источником появившихся в середине нашего века двух новых в истории медицины болезней — вибрационной и шумовой.

Прежде чем перейти к изложению фактического материала, хочется отдать дань благодарности перво-

проходцам, которые впервые заметили «издержки» современной цивилизации, ее теневые стороны и у которых хватило мужества предупредить людей о возможной их опасности для человека. Это, по выражению академика В. И. Вернадского, и есть первейший долг ученого. С чувством глубокого удовлетворения и гордости первопроходцем в этой области должна быть названа Е. Ц. Андреева-Галанина. Именно она впервые в 1946 г. сформулировала суть вибрационной болезни как новую в медицине нозологическую единицу. Спустя десятилетие Е. Ц. Андреева-Галанина с коллективом своих сотрудников также впервые в медицине дала общую характеристику шумовой болезни, создала обширную школу своих последователей, ныне работающих в различных республиках и городах нашей страны. Центром этой школы является Ленинградский санитарно-гигиенический медицинский институт им. И. И. Мечникова, которому принадлежит заслуга в создании необходимых условий для успешной, творческой работы над проблемами патологического действия шума и вибрации. Институту принадлежит честь дальнейшего развития идей Е. Ц. Андреевой-Галаниной по борьбе с болезнями, во многом еще неясными, но несомненно опасными. Последующие поколения ученых будут хранить благодарную память о Е. Ц. Андреевой-Галаниной, инициаторе исследований проблем, рожденных научно-технической революцией.

В первой главе мы стремились показать удивительную гармонию животного мира, включая человека, с одним из компонентов окружающей среды — звуком и вибрацией, гармонию, веками создаваемую в процессе эволюции жизни на Земле. Не хотелось заканчивать ее тревожными размышлениями об угрозе этой гармонии, которую несет научно-техническая революция. Но, как предупредил академик В. И. Вернадский, долг и обязанность ученых — не скрывать возможной опасности тех или иных открытий. Нет необходимости скрывать и опасность, которую могут принести человеку звук и вибрация. В этом физическом факторе внешней среды нет ничего принципиально нового, непривычного для животных и человека. Напротив, он постоянный и необходимый их спутник. Речь идет главным образом о количественных различиях. Так, например, порог чувствительности к звуку у человека по мощно-

сти колеблется в пределах  $10^{-10}$ — $10^{-14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Однако с развитием техники в некоторых производственных условиях, в которых человек долгое время вынужден находиться, интенсивность звука достигает  $10^2$ — $10^3$  Вт/см<sup>2</sup>, т. е. на 13—14 порядков выше порога. Привычный человеческий говор не превышает 50—70 дБ, тогда как на некоторых видах транспорта, в цехах, шум достигает 90—100 дБ, т. е. в десятки и сотни тысяч раз выше привычного для него звука. Интенсивность вибрации на вертолетах, танках, подводных лодках достигает 10—15-кратного превышения гигиенических норм. Частотный спектр вибрации самый различный — от инфра- до ультразвуковой области. Именно эти физические характеристики звука и вибрации и несут угрозу человеческому благополучию, его здоровью и, может быть, его биологической (генетической) судьбе. Мы здесь не будем касаться ни взрывных звуков, уничтожающих все живое, ни взрывов, которые в недавнем прошлом потрясали землю (орудийные залпы, разрывы). Эти звуки не имеют отношения ни к эволюции, ни вообще к биологии, если не считать их способности уничтожать саму жизнь. Появлением этих звуков на Земле человек обязан разуму. Теперь между ними идет поединок, и пока еще неизвестен исход: не окажется ли человек жертвой собственного творения?

Здесь мы будем касаться лишь тех звуков и вибрации, которые вошли в трудовой процесс людей и все в большей степени становятся для нас постоянно действующим фактором. В чем заключается биологическая опасность действия этих факторов? Прежде чем говорить о биологическом действии механических колебаний, необходимо отметить особенности, касающиеся как природы действующих факторов, так и объекта, воспринимающего это действие. При всех видах механических воздействий действующим началом является давление, способное нарушать механическую структуру объекта, выполняющую те или иные физиологические функции. Но такая оценка действия давления справедлива лишь в общем виде.

При анализе результатов биологического действия каждого из видов механических колебаний обнаруживаются значительные различия. Они определяются как физической природой воздействующего фактора, так и механической природой объекта. Говоря о физиче-

ской природе давления, мы имеем в виду давление статическое, типа атмосферного, гидростатического, линейного ускорения, перегрузок, и давление переменное (звуковое, вибрационное). Эффект действия давления на живые объекты в высшей степени различен. Эти различия поразительно велики в количественном отношении.

Вот несколько примеров. Как уже говорилось, слышимый звук воспринимается любыми, в том числе не специализированными для восприятия этого вида энергии клетками. Звуки, интенсивностью 90—100 дБ при частотах 1000—3000 Гц, вызывают в изолированных клетках паранекротические явления, т. е. значительные повреждения, о чем можно судить по увеличению окрашенности витальными красителями. Эффект действия звука становится заметным начиная с частоты 200 Гц. Ниже этих частот эффект отсутствует. Максимальный эффект наблюдается при 2500 Гц; при 5—6 кГц эффект также отсутствует. Было показано, что зависимость повреждения клетки и от интенсивности звука при 95—120 дБ оставалась примерно на том же уровне. Выразим интенсивность звука через давление. 120 дБ соответствуют примерно  $204 \text{ дин/см}^2$ . Как известно, одна атмосфера равна  $10^5 \text{ дин/см}^2$ . Следовательно, при 95 дБ давление составляет приблизительно лишь  $5 \cdot 10^{-3}$  атм.

Далее было проведено исследование действия гидростатического давления на клетки и мышечную ткань. Оказалось, что давление, с которого начинается повреждение, равно приблизительно 200 атм. Но наиболее выраженное повреждение наблюдается при 600—800 атм. По сравнению с переменным давлением разница составляет примерно 11 порядков. Параллельные опыты проведены на изолированном головном мозгу мышей. При действии на головной мозг прерывистым звуком интенсивностью 120 дБ было обнаружено значительное повышение окрашиваемости, что означает повреждение клеток. Однако при гидростатическом давлении аналогичный эффект наблюдается лишь при давлении в 2000 атм, т. е. на 12 порядков выше! Из этих опытов видно, что биологическое действие переменных давлений типы звука и вибрации в миллионы раз более эффективно, чем давление статическое. Следует отметить, что количество энергии в генерации звука (вибра-

ции) крайне незначительно по сравнению с энергией статического давления, вызывающей аналогичный биологический эффект. По мнению английского физика Роберта Вуда, 50-тысячная ревущая толпа болельщиков на стадионе во время футбольного матча за 1.5 ч производит шумом энергию, достаточную лишь для того, чтобы подогреть чашку кофе. Несомненно, столь высокая эффективность механических колебаний не могла не быть использована живой материей в процессе ее эволюции.

Говоря об особенностях объекта, воспринимающего механические раздражения, мы имеем в виду биологическую структуру. Она и является адресатом действия механических колебаний, будь то клетка, ткань или целый организм. Гетерогенность структурной организации объекта является физической основой его чувствительности к механическим колебаниям. Из этого следует важный в методическом отношении вывод: независимо от того, действует ли вибрация на целый организм или на изолированные клетки, механизм этого действия одинаковый. При вибрации организма в целом или локально вибрационная волна иррадирует в любые участки от места приложения датчика. Исходя из чисто физических особенностей действия вибрации мы сочли целесообразным привести несколько примеров прямого действия этого фактора на изолированные клетки и ткани и отметить характер их реакции, приводящий к патологическим процессам.

### **РЕАКЦИЯ КЛЕТОК И ТКАНЕЙ ОРГАНИЗМА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ**

Действие вибрации на изолированные клетки и ткани до сих пор еще не является предметом специальных исследований, хотя каждому исследователю должно быть ясно, что механизм биологического действия вибрации, как и других видов механических колебаний, не может быть разгадан до тех пор, пока не будет изучено ее действие на клетки. Оправданием этому может быть лишь настоятельная потребность выяснить степень реальной опасности развития патологических процессов организма, подвергавшегося вибрации. Именно на выявлении синдромов вибрационной болезни и клиники

этой болезни концентрировалось внимание исследователей. Однако и на фоне всеобщего стремления исследовать действие вибрации на организм в целом давно уже делались попытки исследовать реакции отдельных тканей и органов данного организма.

Одно из первых исследований подобного рода было проведено еще в начале века воспитанником Петербургской военно-медицинской академии А. Е. Щербаком. Автор исследовал влияние вибрации икроножной мышцы кролика на утомляемость ее, вызываемую фарадизацией. Предварительно было установлено, что фарадизация мышц током с частотой 400 интервалов в минуту уже в течение первых двух минут вызывает сильное утомление, судя по высоте (амплитуде) сокращения. Если вслед за фарадизацией мышцы подвергнуть действию вибрации с помощью камертона частотой 110 Гц в течение 30 мин, то утомляемость мышцы значительно усиливается, амплитуда сокращения резко падает. Удивительным и малопонятным является тот факт, что угнетение работоспособности мышц вибрацией сохраняется длительный период времени — до трех суток после фарадизации. Не менее примечательным является наблюдавшийся автором стимулирующий эффект вибрации. Стимулирующее действие вибрации, т. е. повышение работоспособности мышцы, проявляется в тех случаях, когда фарадизации предшествует предварительная вибрация, проводимая по 10 мин ежедневно в течение 6 или 8 сут. Следовательно, вибрация в зависимости от условий и, вероятно, в зависимости от состояния объекта может вызывать как эффект угнетения, так и стимуляции соответствующих биологических функций. Результаты опытов дают указание и на то, что продолжительное действие вибрации вызывает какие-то стойкие структурные изменения, накапливающиеся в объекте в течение продолжительного времени.

Исследования действия вибрации на изолированные ткани были продолжены лишь через 50 лет. Мышцы лягушки подвергались вибрации в растворе красителя (нейтрального красного) с частотой 4—6 Гц, амплитуда колебаний 2.5 мм в течение 1.5 ч. Ставилась альтернативная задача: действует или не действует вибрация с такими параметрами на сорбционные свойства

мышц.<sup>1</sup> Как оказалось, вибрация резко повышает способность мышц связывать краситель; если принять количество красителя, сорбируемого контрольными мышцами за 100, то мышцы в результате вибрации увеличивают связывание красителя до 158 %. Наряду с мышцами были исследованы сорбционные свойства семенников, почек и кусочков кожи, подвергавшихся вибрации. Оказалось, что более всего повысилась сорбционная способность семенников — на 274, почек — на 250, кусочков кожи — на 137 %. Следовательно, вибрация вызывает довольно глубокие изменения протоплазматических структур. Впервые установлено, что различные клетки обладают различной чувствительностью к вибрации, что свидетельствует и о различии их субклеточных структур. О молекулярных процессах, разыгрывающихся в мышечных волокнах, дают представление опыты, проведенные на глицеринизированных мышцах кролика.

Пучки нитей мышц диаметром 0.05—0.1 мм и длиной до 30 мм помещались в соответствующую среду (рН 7), куда добавлялось определенное количество АТФ, подвергались ритмичному растяжению с частотой в 5 Гц и амплитудой 2 мм. Через равные промежутки времени в среде определяли содержание неорганического фосфата. Прирост количества фосфата в единицу времени означает усиление интенсивности процесса дефосфорилирования и, следовательно, повышения АТФазной активности. Прекращение растяжения приостанавливало прирост неорганического фосфата. Если заблокировать АТФазу реактивов ЕДТА то, естественно, в этом случае растяжение не вызывает увеличения неорганического фосфата. Кроме повышения АТФазной активности при растяжении мышц наблюдается генерация биопотенциалов. Возникновение тока действия объясняется нарушением структуры мембран, в результате чего нарушается ионное равновесие, что и создает разность потенциалов.

Проведены тщательные исследования деформации мышц лягушки *in vitro*. Оказалось, что существует определенный порог деформации, за которым следуют, вероятно, и пороговые физиологические сдвиги. Порог

---

<sup>1</sup> Повышение сорбции прижизненных красителей клетками является признаком их повреждения.

деформации измеряется в микрометрах, среднее его значение в мышце лягушки составляет 8.5 мкм. По мнению некоторых исследователей, эта величина порога довольно постоянна. Скорость проявления деформации составляет 1—2 мл/с. Интересные исследования проведены на мышцах наркотизированных кошек. Несмотря на наркотизацию, обнаруживаются спонтанные импульсы, снимаемые с отходящего нерва.

Растяжение мышцы повышает чувствительность к вибрации. Однако это зависит от исходного уровня спонтанной активности: если он высок, то дополнительное растяжение тормозит синхронизацию импульсов с частотой вибрации; если исходный уровень низкий, тогда синхронизация повышается. Было обнаружено, что в ответ на вибрацию мышцы не при всех частотах удается наблюдать потенциалы, снимаемые с соответствующего нервного волокна, иннервирующего мышечное веретено. В диапазоне вибрации с частотой 25—500 Гц наблюдается несколько провалов, когда снимаемый потенциал либо намного меньше максимального, либо полностью отсутствует. Результаты исследования дают основание сделать вывод, что характер реакции в ответ на вибрацию определяется структурой мышечного веретена, ее физическими и механическими свойствами: вязкостью, эластичностью. Показано, что максимальная величина потенциала наблюдается при вибрации с частотами 100—200 Гц. Это может быть объяснено лишь наличием структур, для которых частоты вибрации являются резонансными.

Аналогичные исследования проведены на сгибателе пальцев лягушки. Дистальный конец мышцы крепился к мембране, через которую задавалась вибрация. Исследовалось действие низкочастотной вибрации в пределах 4—10 Гц. На наркотизированных животных показано, что в результате вибрации в мышечном веретене возникают групповые импульсы, причем с увеличением частоты вибрации число групповых импульсов уменьшается.

До сих пор мы говорили о генерации спайкового потенциала при вибрации мышц, но, вероятно, бегущий импульс является частным случаем эффекта вибрации мышцы; наряду с этим имеются и стойкое возбуждение, и электротоническая передача действия вибрации, приводящая к тоническому сокращению. Такая безимпуль-

сная сигнализация наблюдается при растяжении мышцы ноги краба.

Последствия прямого действия вибрации наблюдаются и на субклеточных и даже на молекулярных структурах. Так, в нашей лаборатории подвергали вибрации суспензию митохондрий с частотами 25, 50, 150, 200 и 300 Гц, с ускорением 5 g 20 мин. Показателями реакции служили интенсивность поглощения  $O_2$  и эстерификация неорганического фосфата. Оказалось, что вибрация частотой 100 Гц и ускорением 5 g значительно (в среднем на 25 %) подавляет потребление  $O_2$ . Вибрация с частотами 150—200 Гц несколько повышает интенсивность потребления кислорода. Заслуживает внимания удивительный факт, наблюдаемый в этой серии опытов. Вибрация с частотой 100 Гц достоверно и очень значительно (до 50 %) повышает резистентность мышцы к высокой температуре (см. рис. 3). Удивительным является то обстоятельство, что при этих условиях вибрации поглощение кислорода митохондриями подавляется. Значит, повышение резистентности, которая, казалось бы, должна быть связана с повышением потребления кислорода, в данном случае с ним не связана. Вибрации подвергали также клетки костного мозга и судили о результатах по митотическому индексу. Показано, что вибрация в широком диапазоне частот (20, 70, 150, 200, 500, 800, 1000 Гц) значительно подавляет митотическую активность, клетки перестают делиться. Подвергали вибрации изолированные мышцы с частотой 25 Гц и затем из этих мышц экстрагировали белок — актомиозин и определяли его ферментативную активность. Оказалось, что в результате вибрации мышцы ее белок потерял способность расщеплять АТФ.

Результаты проведенных опытов показывают, что вибрация затрагивает фундаментальные основы жизни клетки: размножение, способность к репарации, резистентность, ферментативные свойства ее белка и другие морфофизиологические процессы (см. схему).

В этих опытах наблюдаются два интересных и важных факта: во-первых, эффект вибрации в значительной степени зависит от ее частоты. Так, резистентность мышцы при 100 Гц повышается, а при 25 Гц подавляется. Каждая структура, как надо полагать, имеет свою резонансную частоту, к которой она особенно чувстви-

тельна. Во-вторых, это — зависимость эффекта вибрации от ускорения. И здесь наблюдается своеобразное парадоксальное явление. Так, резистентность мышц подавляется при 25 Гц и ускорении 5 g. Но, если увеличить ускорение (интенсивность), например в 2 раза, (10 g), то, казалось бы, эффект тоже должен увеличиться примерно вдвое, в действительности же эффект вибрации вообще отсутствует (рис. 7). Что любая био-



Рис. 7. Изменения резистентности мышц крыс в зависимости от интенсивности вибрации.

По оси абсцисс — ускорение; по оси ординат — резистентность (% к контролю).

логическая структура особо чувствительна к своей резонансной частоте, подтверждается во всех проведенных нами опытах. Так, для актомиозина резонансной частотой является 200 Гц. Поэтому, в каком бы состоянии белок ни находился: в растворе, в мышце, в организме — во всех случаях вибрация с частотой 200 Гц подавляет его активность (рис. 8).

### **МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ОРГАНИЗМЕ ПРИ ВИБРАЦИИ**

Следует иметь в виду, что изменения той или иной функциональной системы в результате действия вибрации являются отражением определенных морфологических изменений. К сожалению, современные методы исследования структурных нарушений клеток и тканей организма, подвергавшихся вибрации, не дают возмож-

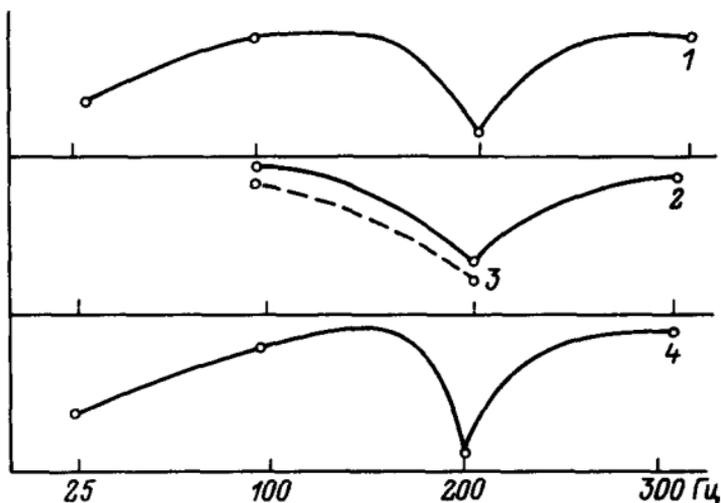


Рис. 8. Резонансный эффект действия вибрации на живые структуры различных уровней организации.

1 — целый организм, 2 — мышца, 3 — гомогенат, 4 — белок. Остальные обозначения — в тексте.

ности вести наблюдения за изменениями *ин ситу*. Поэтому соответствующих данных о морфологических изменениях в организме при действии вибрации крайне мало. Наиболее ярко выраженные изменения в органах наблюдаются при действии низких частот, но при больших ускорениях. Такая вибрация часто приводит к смертельному исходу.

С помощью X-лучевой кинематографии изучали смещение органов кошки, подвергавшейся вибрации. При этом исходили из предположения, что наиболее опасными для жизни являются смещения сердца, легких. Максимальное смещение сердца наблюдается при 12—18 Гц. При этих же частотах наблюдались кровоизлияние в легких, капиллярный застой в почках. Вообще кровоизлияние под действием вибрации наблюдалось рядом авторов, в частности в легких у мышей при вибрации с частотой 15—25 Гц и ускорении 10 g. При вибрации собаки с частотой 46 Гц, амплитудой 2 мм, по 30 мин ежедневно в течение 10 сут наблюдались: кровоизлияние в сердце, фрагментация мышц, зернистое перерождение мышечных волокон, дискомплексация печеночных балок, расширение капиллярного русла, пролиферация эндотелия кровеносных сосудов. В почках видно набухание эндотелия сосудистых клубочков, гиперхроматоз ядер, вакуолизация и дистро-

фия эндотелия извитых канальцев. В щитовидной железе фолликулярный эпителий слущивается, в нем отмечается разжижение коллоида. В надпочечниках наблюдается некробиоз клубочковой зоны. Вероятно, нет морфологических систем организма, которые не были бы нарушены вибрацией. В этом проявляется особо угрожающее ее действие.

Проведенный еще в начале 60-х г. советскими учеными рентгеноскопический анализ органов и тканей организмов, подвергавшихся систематическому действию вибрации, показал, что в первую очередь наблюдаются изменения в суставах и костях. Проведены обширные обследования рабочих — обрубщиков металла. При этом были отмечены такие наиболее характерные нарушения: появление островков уплотнения эностазов, мелких кистозных образований, деформация суставов, значительное их обызвествление. При более тяжелых стадиях вибрационной болезни наблюдается истончение и отторжение костных фаланг. Важно отметить при этом параллелизм заболевания: деструкция костей, полиневрит и нарушение микроскопической структуры мышц, иногда их перерождение. Возможно, однако, что первоисточником или первопричиной всех последующих патологических процессов является нарушение сосудистой системы.

По данным болгарских ученых Г. Коджиденова и П. Герасимова (1969), в зависимости от характера выполняемой работы различают 4 вида костно-суставных заболеваний: 1) кистевидные изменения, аностазы в мелких костях запястья; 2) изменения в сухожилиях в мышцах, в местах их прикрепления к костям; 3) эпифазы длинных трубчатых костей, острые хондрозы и острые некрозы; 4) периартикулярные обызвествления. По мнению авторов этих исследований, данное заболевание не связано со стажем работы по этой профессии. Более поздние наблюдения и обследования шахтеров, литейщиков, каменотесов, работающих пневматическими вибрирующими инструментами, показали, что деструктивные патологические изменения наблюдаются не только в позвоночнике, как это чаще всего отмечалось, но и в костях грудной клетки. Имеют место остеонекроз позвоночника, сужение межпозвоночных дисков. Указанные изменения наблюдаются в любом возрасте и не вполне зависимы от стажа работы. Отме-

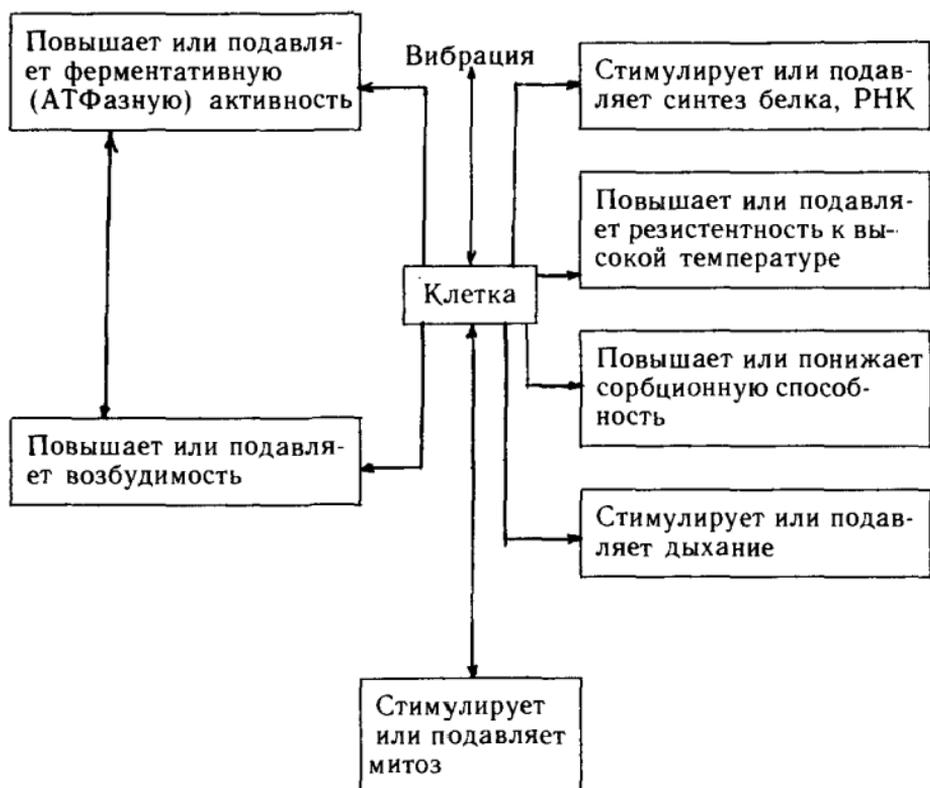


Схема единого принципа реакции клетки в зависимости от ее параметров.

ченные изменения в костях и хрящах являются характерными для вибрационной болезни.

Анализируя эти и другие характеристики вибрационной болезни, делаются далеко идущие выводы общебиологического значения, что систематическая вибрация в сочетании с другими неблагоприятными факторами, сопровождающими труд человека: физическое и моральное утомление, температурный фактор, атмосферные явления — ускоряет процесс старения организма. Исследования структурных изменений, вызванных действием вибрации на изолированной нервной клетке, впервые были проведены в нашей лаборатории. Объектом служили нервные клетки спинальных ганглиев крыс. Ганглии подвергались вибрации во влажной ка-

мере в течение 30 мин с частотами 25, 100, 150 и 200 Гц при постоянном ускорении, равном 5 g.

Изменения в нейронах, вызванные вибрацией, изучались с помощью электронного микроскопа. Вибрация вызывает резкие изменения субмикроскопических структур клеток: меняется электронная плотность, ядерная оболочка приобретает извилистые, складчатые контуры, митохондрии фрагментированы, иногда видны лишь их тени. В эндоплазматической сети наблюдается скопление электронно-плотных гранул. Цитоплазма резко вакуолизирована, четко вырисовываются прото-нейрофириллы, характер и степень нарушения субмикроскопических структур зависят, при прочих равных условиях, от частоты вибрации. Максимальный эффект наблюдается при частоте 100 Гц.

Результаты приведенных выше экспериментальных исследований убедительно свидетельствуют о специфической особенности вибрации как патологического фактора. Нет таких биологических структур, которые были бы инертными к действию вибрации. На любом уровне организации от молекулы белка, биополимеров до организма в целом вибрация способна оказывать определенное биологическое действие (схема).

### **ДЕЙСТВИЕ СЛЫШИМОГО ЗВУКА НА КЛЕТКИ И ТКАНИ ОРГАНИЗМА ЖИВОТНЫХ**

Как уже было сказано, честь открытия прямого действия слышимого звука на клетки и ткани организма принадлежит Д. Н. Насонову и К. С. Равдонику. Звуковое воздействие, по мнению Д. Н. Насонова, связано с денатурацией протоплазматических белков. Д. Н. Насонов вполне логично сделал предположение, что звук может вызывать повреждения не только слуховых рецепторов, но и любых других клеток.

Теперь, спустя уже почти полвека, такой путь мышления кажется излишне сложным. Действие слышимого звука можно постулировать исходя из наличия механорецепторов у животных всех уровней эволюционного развития. Невозможно себе представить появление в эволюции звуко-рецепторов, если протоплазма живых

клеток была бы инертной к действию звука; к тому же совсем необязательно, что этот звук непременно вызывал денатурационные явления. В настоящее время уже не столь важно, какой логический путь привел к открытию биологического действия звука. Наука пользуется плодами этого открытия, отдавая благодарную дань его автору, а путь, приведший к этому открытию, представляет только исторический интерес.

Основные данные получены в опытах на портняжной мышце лягушки. Изолированные мышцы подвергались озвучиванию различной частотой и интенсивностью. Мерой оценки биологического действия звука служила величина связываемого мышцей красителя: чем сильнее мышца окрашивается, тем она более повреждена. Первые же опыты показали, что действительно звук вызывает довольно значительные повреждения мышечной ткани. Следовательно, звук является биологически эффективным фактором внешней среды. Эти опыты были повторены, и результаты оказались идентичными.

Наряду с этим фундаментальным фактом исследования биологического действия звука позволили получить ряд новых данных, которые представляют не только существенную теоретическую, но и практическую значимость. Было, в частности, показано, что максимальный эффект действия звука в пределах интенсивности от 95 до 120 дБ наблюдается при частоте 2500—3600 Гц. Удивительным здесь является то, что звуковая частота в 2.5—3.5 кГц является оптимальной для восприятия звука человеческим ухом. Значит, рецепторные клетки органов слуха человека и изолированные из организма мышцы лягушки настроены на одну частоту. По мнению Д. Н. Насонова, этот факт может быть объяснен с точки зрения резонанса. В рецепторных клетках органа слуха, как и в мышцах, подвергавшихся исследованию, имеются структуры (например, белковые), которые резонируют одну и ту же звуковую частоту, в результате чего в рецепторных клетках наступает возбуждение, а в мышечной ткани (в данном случае) наблюдается альтернация структуры, которая и сопровождается усилением окрашиваемости. Максимальный эффект биологического действия звука с частотой 2.5—3.5 кГц наблюдается также на нервных клетках спинальных ганглиев кролика. Здесь, однако,

следует оговориться, что частотный максимум эффективного действия звука для разных клеток не обязательно должен быть один и тот же. Более того, он непременно должен быть различным хотя бы потому, что во всем животном царстве оптимальные частоты воспринимаемых колебаний необычайно разнообразны: от нескольких единиц до сотен тысяч герц.

Клетки состоят из различных структур, субклеточных компонентов с различным содержанием воды, растворенных в ней веществ. В связи с этим уже априори можно ожидать, что различные клетки будут обладать различной чувствительностью к одной и той же частоте звука. Другая особенность биологического действия звука заключается в абсолютной величине его энергии. Об этом мы уже говорили выше, когда отмечали, что она ничтожно мала по сравнению с механической энергией статического давления. Здесь мы добавим одно существенное уточнение относительно интенсивностей давлений: переменного (при звуке) и статического (гидростатического). Мы пользовались лишь теоретической величиной давления, соответствующей, например,  $120 \text{ дБ} = 204 \text{ дин/м}^2$ . Однако в опытах Насонова и Равдоника мышца при озвучивании находилась в растворе красителя. Следовательно, звук должен был проникнуть через определенный слой раствора красителя. Известно, что при встрече со средой большей плотности, например с водной поверхностью, звук отражается более чем на 90 %. Звуковые колебания, поступившие в водную среду, теряют интенсивность не менее чем на порядок. Из этого следует, что интенсивность звукового давления, действующего непосредственно на мышцу, по меньшей мере на порядок ниже теоретически значимой интенсивности. Это необходимо иметь в виду при оценке биологического действия переменного давления (звук и вибрации) и постоянного (гидростатического, атмосферного). Вероятно, эта разница в эффективности действия переменного и постоянного давления достигает 12—13 порядков.

До сих пор мы приводили данные о действии слышимого звука на изолированные клетки и ткани организма. Естественно, что наиболее важным является вопрос о действии звука на целый организм. Первую попытку подобных экспериментов мы предприняли с К. С. Равдоником на кроликах. Ставился вопрос: как реагируют

различные нервные и другие клетки организма инситу на мощный звук (орудийный залп, равный 200 дБ). Животные находились в 6 м от источника звука. Опыты показали, что даже через 4—6 ч после действия звука клетки и симпатических ганглиев, и чувствительные клетки спинальных ганглиев обнаруживали следы явного повреждения. Аналогичные результаты наблюдались на шейных ганглиях. Иной оказалась реакция эпителия роговицы глаза кролика. Казалось бы, клетки, пограничные с внешней средой, должны быть в первую очередь альтерированы звуковой волной. В действительности же во всех опытах роговица озвученных кроликов связывает красителя меньше, чем в контроле. Приведенные результаты опытов показывают, что клетки и ткани организма далеко не индифферентны к звуку. Как известно, клетки симпатических ганглиев глубоко погружены в толщу ткани, и тем не менее они довольно отчетливо и значительно повреждаются однократным действием мощных звуков. Более того, они оказались поврежденными и в тех случаях, когда улитка была предварительно разрушена. Следовательно, действие звука осуществлялось не через орган слуха, а непосредственно.

Опыты по действию звука на организм животных мы продолжили лишь 10 лет спустя и в несколько иной методике. Для общей проблемы патологического действия звука они представляют несомненный интерес, и мы считаем целесообразным отметить их основные результаты. Опыты проводились на белых крысах. Была использована методика получения эпилепсии под влиянием мощных звуков. Возможно, что повышенная чувствительность к звуку, действие которого часто сопровождается судорожными приступами, каким-то образом обусловлено генетически. Не каждое животное реагирует на звук такими приступами. Вероятно, существует какая-то генетическая зависимость реакции животных на звук; в одном случае быстро наступают приступы судорожных движений (эпилепсии), у других особей таких приступов вызвать не удалось.

Сам по себе факт — наличие дифференциальной чувствительности к звуку у животных одного и того же вида, одного возраста, пола (самцы) — представляет несомненный интерес. Врачи постоянно встречаются с подобной загадкой биологии — индивидуальная чув-

ствительность к факторам внешней среды, к фармакологическим средствам, к различным видам терапии и др.

Для опытов отбирались особи, у которых на звук появлялись однотипные характерные приступы эпилепсии. Ставилась задача выяснить, что происходит с различными по своему физиологическому назначению тканями и органами в результате эпилептических припадков, вызванных звуком?

Исследования показали, что звук мощностью 120 дБ в течение 3—5 мин вызывает у крыс ярко выраженный приступ эпилепсии с характерными при этом судорогами конечностей. Припадки повторяются и некоторое время после выключения звука. Как реагируют на этот звук органы и ткани животного? В каком состоянии находятся они в период приступов эпилепсии? Состояние органов оценивалось по их способности сорбировать краситель, внутривенно введенный перед действием звука. Опыты показали, что нейроны головного мозга находятся в состоянии повышенной возбудимости, о чем свидетельствует достоверное снижение окрашиваемости. Особенно значительные различия в снижении сорбционной способности по сравнению с контролем наблюдаются в коре мозга, подкорке и мозжечке. Напротив, почки сорбируют краситель на 32 % больше по сравнению с контролем, что указывает уже на структурные повреждения клетки. Поскольку эпилепсия — явление нервной природы, то, казалось бы, естественным ожидать значительных морфофункциональных нарушений самих нейронов мозга. Однако этого не наблюдается. Приступ «ограничивается» чрезмерным патологическим возбуждением нейронов, вероятно всей нервной системы организма, не вызывая при этом повреждения клеточных структур.

И еще одно трудно объяснимое явление наблюдалось в этих исследованиях. Общеизвестной в биологии является адаптация. Это — одно из фундаментальных свойств живой материи всех уровней организации, от клетки до человеческого организма. На постоянный монотонно действующий раздражитель, если он более не угрожает гибели, объект адаптируется и более «не считает нужным» на него реагировать! Но здесь этого явления не происходит. Мы ежедневно в течение 60 сут повторяли опыты. Результаты были неизменными: че-

рез 3—5 мин озвучивания наступали приступы эпилепсии. Создается такое впечатление, что в течение этого продолжительного действия звука сформировался своеобразный «условный» рефлекс. Таково одно из возможных проявлений биологического действия звука на организм. Отдаленные последствия этого действия, судя по литературным данным, весьма опасны: наблюдаются параличи, парезы конечностей, паралич сфинктера мочевого пузыря; молодые животные не достигают зрелого возраста. Нарушается способность к воспроизводству потомства и др.

### **ДЕЙСТВИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ НА КЛЕТКИ И ТКАНИ ОРГАНИЗМА**

Физическая природа звука и вибрации одна и та же. В обоих случаях речь идет об упругих колебаниях, волнообразно распространяющихся в среде газообразной, жидкой и твердой. Вместе с тем, как мы уже отмечали, биологический эффект действия звука и вибрации на клетки и ткани организма далеко не одинаков. К сожалению, природа различий в действии этих двух физически родственных факторов во многом еще не изучена. Для эффективного действия вибрации существенным ее параметром являются ускорение, частота колебаний гравитационных сил, векторы этих колебаний. Для звука, однако, ведущими параметрами являются интенсивность, выраженная через давление, и так же, как для вибрации — частота: в первом случае вибрационная, во втором — звуковая. Но ближе эти различия до сих пор не установлены.

Для сравнения эффективности действия на один и тот же объект звука и вибрации проведены следующие опыты. Эстрагированный из мышц белок миозин подвергался действию звука. Эффективность действия звука оценивалась по степени денатурации белка. Оказалось, что при действии звука максимальный эффект наблюдается при частоте 3000 Гц (так же, как у Насонова и Равдониика на мышцах). Далее, из раствора белка получали миозиновые нити и также действовали на них звуком различной частоты. Мерой оценки эффективности действия звука служила величина связываемого красителя нитями. Оказалось, что

и в этом случае максимальный эффект действия звука наблюдается в области 3000 Гц. Именно эти объекты (белок в растворе — актомиозин) и гомогенат тех же мышц мы подвергали вибрации с различными частотами. Эффект действия вибрации оценивали по изменению ферментативной активности (АТФазной активности актомиозина). Во всех случаях максимальный эффект наблюдался при вибрации частотой 200 Гц. Далее мы попытались найти наиболее эффективные частоты вибрации для мышцы, оценивая эффект вибрации также по изменениям АТФазной активности белка, экстрагированного из этой мышцы. Оказалось, что частотой, при которой все более нарушается ферментативная активность, также является частота 200 Гц.

Мы уже видели, что при действии звука с частотой (200 Гц) на те же объекты никакого заметного эффекта не обнаруживается. Тогда как при вибрации с частотой 200 Гц в какой бы упаковке белок ни находился, вибрация будет оказывать на него максимальное действие. 200 Гц — это резонансная частота данного белка (рис. 8).

При сравнении эффективных частот звука и вибрации при их действии на самые различные по своим характеристикам клетки и ткани частота вибрации примерно на порядок ниже частоты звука. Природа этого различия пока не ясна.

Ниже приводятся данные серии экспериментов по выяснению действия низкочастотной вибрации на ткани и органы мышей. Результаты многочисленных опытов показали, что низкочастотные вибрации в большинстве исследованных тканей, за исключением селезенки и печени, вызвали заметные, статистически достоверные структурные изменения в клетках. Установлено также, что степень их изменения для каждой ткани и органа различна, что свидетельствует о их различии чувствительности к данным частотам вибрации. Более чувствительными оказались ткани нейrogenного происхождения, особенно при вибрации с частотой 25 Гц.

Оценивая роль частотных характеристик вибрации в ее биологическом действии на ткани организма, бросается в глаза одно удивительное и пока еще трудно объяснимое явление — отсутствие каких бы то ни было заметных изменений в тканях от вибрации с частотой 50 Гц. Почему вибрация с частотой 25 Гц вызывает

довольно значительные субстанционные изменения тканей, но еще более значительными являются изменения, наблюдаемые при вибрации с частотой 75 Гц, а при 50 Гц — отсутствуют? К сожалению, для объяснения этого явления мы не имеем сколько-нибудь убедительных экспериментальных данных и вынуждены ограничиться некоторой аналогией, например с сердечной деятельностью. Как известно, сердце работает в строго постоянном ритме. Если мы будем подавать сигналы раздражения сердца в том же ритме, это будет способствовать улучшению его деятельности в привычном для него ритме. Представим себе, однако, подачу сердцу стимулов, попадающих в противофазу его ритма. Тогда неизбежны сердечные перебои с катастрофическим последствием для его дальнейшей судьбы. Нечто подобное можно представить и для других тканей, предполагая, что не только сердце, но и все живые ткани «работают» в определенном ритме (в данном случае в области 50 Гц), и ритм с такой частотой, подаваемый извне, будет вызывать лишь улучшение их деятельности. Напротив, другие ритмы, например 25 и 75 Гц, приведут к серьезным нарушениям и структуры, и функции этих тканей, что нами и наблюдалось.

Основной вывод из этой серии опытов заключается в том, что вибрация организма ин тото не отражается от поверхности тела животного, как это характерно для звука, а проникает во все органы и ткани, вызывая соответствующие нарушения их деятельности. Конечно, звуковые волны частично проникают через толщу тканей, но давление звуковой волны при этом значительно снижается, и поэтому наиболее эффективным местом действия звука являются рецепторы поверхности тела «экстероцепторы» — представители нервных центров. Поэтому становится понятным тот факт, что звук, в особенности смешанный шум, является источником головных болей, неврозов, психических расстройств. Вибрация же имеет своим адресатом действия структуры всех тканей организма, и, следовательно, патологические явления при ее действии на целый организм могут быть самые различные и в самых различных участках организма (кости, мышцы, сердечно-сосудистая система, нервные клетки и др.). Это определяется в значительной степени физическими характеристиками вибрации.

Приведем еще один поучительный пример, который подтверждает мысль о множественном характере явлений, вызываемых вибрацией, о многообразии патологических процессов, возникающих в результате ее действия.

Как мы уже не раз подчеркивали, для белка — актомиозина резонансной частотой вибрации является 200 Гц. Кроме этой частоты значительный эффект вызывается и вибрацией с частотой 25 Гц; в какой бы упаковке белок ни находился — эти частоты его найдут. При действии вибрации с этой частотой белок теряет способность расщеплять АТФ, добывать энергию для работы мышц. Будем теперь, исходя из идеи, что характер патологии определяется физической характеристикой вибрации, подвергать животное вибрации с частотой именно в 25 Гц, заведомо зная, что кроме прочего белок (актомиозин) при этом будет утрачивать АТФазную активность. Как это скажется на состоянии организма? Опыты подтвердили ожидаемые результаты (рис. 9). Животные, подвергавшиеся виб-

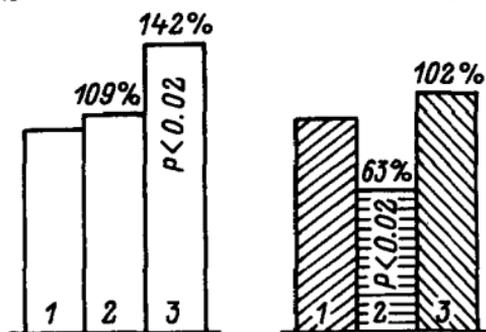


Рис. 9. Подавление физической выносливости животных вибрацией с частотой 25 Гц, ускорением 5 г, в течение 30 мин.

1 — фон: время плавания до вибрации, принимаемое за 100, 2 — 1-е сутки, 3 — 2-е сутки. Слева — контроль, справа — опыт (после вибрации).

рации, утратили физическую силу держаться на воде, плавать. Эти данные в высшей степени поучительны. Становится понятным, почему экипажи вертолетов, трактористы, танкисты и вообще лица других профессий, казалось бы, не выполняя в процессе своей трудовой деятельности непосредственно физической работы,

но подвергающиеся вибрации, ощущают невероятную физическую усталость. Теперь это явление уже экспериментально доказано.

В проведенных опытах обнаруживаются два очень важных факта. Во-первых, вибрация подавляет физическую выносливость в первые же часы своего действия, и этот эффект, по нашим данным, сохраняется в течение нескольких суток. Из этого следует очень важный практический вывод — необходимо исключать всякие физические нагрузки лицам, подвергавшимся в процессе трудовой деятельности вибрации. Во-вторых, вибрация нарушает (подавляет) одно из фундаментальных биологических свойств мышц — способность повышать функциональную активность посредством тренировки. После вибрации эту способность мышцы на какое-то время утрачивают.

Приведенные опыты показывают также исключительное значение избирательного (именно избирательного!) действия вибрации в возникновении патологических процессов.

В третьей главе мы постараемся показать, что избирательность действия вибрации может оказать и существенную услугу человеку в его борьбе с различного рода недугами.

### **СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ШУМА И ВИБРАЦИИ НА ОРГАНИЗМ ЖИВОТНЫХ И ЧЕЛОВЕКА**

До сих пор мы приводили данные, касающиеся действия вибрации на человека и животных, умалчивая о том, что вибрация неизбежно сопровождается звуком в довольно широком диапазоне интенсивности. В сущности не только в производственных, но и в лабораторных условиях практически невозможно разделить эти факторы — вибрацию и звук. Это обстоятельство затрудняет выяснение механизма биологического действия «чистой» вибрации на объекты. Данные, которыми мы располагаем, являются результатом суммарного действия шума и вибрации. Тем ценнее кажутся нам исследования вибрации, которые были проведены с учетом наличия шума, его интенсивности.

На производстве интенсивность шума часто превышает установленные гигиенические нормы по частоте и интенсивности. Довольно часто, в зависимости от характера производства, шум, как, впрочем, и вибрация, имеет прерывистый характер, который более вреден, чем сплошной. Проведены обследования рабочих судоремонтных предприятий, где частота вибрации доходила до 2000—3000 Гц, амплитуда — от 0.1 до 0.52 мм, а интенсивность шума — 105 дБ. Действие вибрации сочеталось с шумом указанной характеристики. В таких условиях у ряда рабочих наблюдались ангиоспазм, боли в пальцах, тремор конечностей, повышение кровяного давления.

Действие шума сказывается прежде всего на органах слуха, вызывая в них болевые ощущения. При этом наблюдается удивительный по своей природе феномен — асимметрия в изменении чувствительности уха. Отмечается также, что молодые рабочие более реактивны к совместному действию шума и вибрации. Это, возможно, связано с тем, что у пожилых рабочих с большим производственным стажем пороги слышимости повышены, часто наблюдается значительная потеря слуха. Напротив, у молодых рабочих каналом восприятия шума является орган слуха, функция которого еще не нарушена, и потому полностью воспринимается звуковая энергия в сочетании с вибрацией, вызывая наиболее ощутимые результаты.

Более подробные исследования совместного действия шума и вибрации проведены на крысах. Животные массой 180—200 г подвергались длительной, до двух недель, вибрации с частотой 6 Гц при амплитуде 0.033 мм и 10 Гц при амплитуде 0.020 мм. В этих условиях интенсивность шума равнялась 72 дБ. Реакция животных оценивалась по изменению содержания кортикостероида в плазме периферической крови, аскорбиновой кислоты в надпочечниках и веса надпочечников. В первые два дня опытов с сочетанием вибрации и шума вызывают снижение количества кортикостероидов в крови с 26 % в контроле до 15.3 % в опыте; чистый шум в этих условиях опыта достоверных изменений не вызывал, можно говорить лишь о некоторой тенденции к повышению (с 26 до 28.4). По мере увеличения срока действия исследуемых факторов, содержание кортикостероидов заметно уменьшается, и при действии только

шума на 12-е сутки опытов содержание кортикостероидов оказалось одинаково уменьшено до 14.6 % как в случае совместного действия вибрации и шума, так и одного лишь шума. Аналогичные результаты получены и при вибрации с частотой 10 Гц.

Проводились исследования продолжительного действия вибрации и шума (до 18 сут). Было показано, что совместное действие вибрации и шума повышает содержание в крови сахара, холестерина, липопротеида. Оказалось, что рост животного (судя по весу) резко замедлен — до 50—60 % (по сравнению с нормой). Вероятно, в силу того, что вибрация и шум — одной физической природы (механической), их совместное биологическое действие суммируется.

### **ДЕЙСТВИЕ ШУМА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ**

Два вида механических колебаний — звук и вибрации, принято различать по среде их передачи при распространении от источника генерации этих колебаний. Колебания, распространяющиеся по воздуху, называют звуковыми, и, в зависимости от частоты, их делят на колебания инфразвуковой области (ниже 10 Гц) и области слышимых звуков (от 10—16 до 20 000 Гц). Частоты, превышающие указанные, относятся к ультразвуковой области. Шумы представляют собой смесь частот любой части звукового спектра.

Давно уже известно, что звук как смешанных, так и чистых тонов вызывает деструктивные изменения в биологических объектах. Долгое время биологи проявляли интерес к биологическому действию звука с точки зрения его экологического значения, физиологи исследовали механизм звуковой рецепции, врачи исследовали и контролировали нормальное и патологическое состояние органов слуха. Однако в настоящее время на человека действуют звуки небывалой интенсивности, в миллион раз превышающей ту, на фоне которой протекала вся предшествующая история его развития. Это приводит к глубоким патологическим процессам, угрожая в будущем судьбе человека — этого царя природы (Андреева-Галанина и др., 1972). Возникла настоятельная необходимость более глубокого исследова-

ния механизма биологического действия звуковой энергии, прежде всего смешанного спектра частот. Речь идет, как и в случае вибрации, о прямом, нерецепторном действии звуковых колебаний на клетки и ткани организма, минуя специализированный орган слуха. При этом следует помнить, что звуковые колебания продолжают свое патологическое действие на организм и в тех случаях, когда орган слуха, как некий предохранитель «высокого напряжения», выбывает из строя.

Сведения Всемирной организации здравоохранения о числе профессиональных заболеваний рабочих предприятий с повышенной интенсивностью шума, к сожалению, касаются лишь утраты слуха, жалоб на головные боли, неврозоз и др. Это результат действия шума на рецепторы, но есть и прямое действие звука помимо рецепторов. Пока нет сводок о прямом действии механических колебаний инфра- и звукового диапазона частот, вследствие чего мы ограничимся лишь ссылкой на отдельные исследования, иллюстрирующие эффект биологического действия этого вида энергии. Известно, что действие мощных звуков на организм может привести к летальному исходу. Полагают, что гибель животных, подвергавшихся сильному звуковому воздействию (порядка 150 дБ) обусловлена действием температуры, которая при этом развивается. Звуковая энергия, абсорбированная поверхностью тела животного, преобразуется в тепло, которое в случае превышения определенных границ и вызывает смерть. Авторы отмечают, что при частоте 3000 Гц смерть наступает в течение 9 мин. Возможно, что эта частота является резонансной, при которой амплитуда, и в данном случае кавитация, резко увеличивается.

О прямом действии звука свидетельствуют опыты исследования микрофонного потенциала внутреннего уха (кохлеарного нерва) на наркотизированных животных. Было установлено видовое различие чувствительности ганглиозных клеток к интенсивности звука. Поскольку подопытные животные были наркотизированы, то, как надо полагать, действие звука воспринималось не рецепторами, а непосредственно ганглиозными клетками.

Известно, что звук интенсивностью 94 дБ подавляет экспериментально вызванный лейкоцитоз животных. Из этих данных следует, что звук пронизывает все ткани

организма, вызывая в них функциональные и структурные нарушения. Если учесть при этом, что каждая клеточная популяция (нервная, мышечная, эпителиальная), каждая функциональная система обладают своей, специфической для нее чувствительностью к звуковым воздействиям, то становится понятным многообразие форм патологии, вызываемой звуком (шумом), как и вибрацией.

В норме шум воспринимается всеми рецепторами, а, например, для телец Пачини он является адекватным раздражителем. Но при более мощных звуковых воздействиях, по нашему мнению, рецепторы перестают «работать». Происходит своеобразное «зашкаливание», и звуковая энергия воспринимается всеми тканями организма.

К сожалению, мы еще не знаем степени чувствительности нерцепторных клеток к звуку и вибрации; таких исследований нет и поныне. Между тем отсутствие этих знаний затрудняет понимание механизма биологического действия звука и вибрации.

Итак, вибрация и звук при определенных условиях являются биологически опасным фактором, угрожающим целостности организма. Эта опасность для человека стремительно возрастает в связи с развитием техники, так как увеличивается интенсивность сопутствующих факторов, при действии которых и вибрация, и шум становятся особенно опасными. Речь идет о температуре окружающей среды, степени загрязнения атмосферы, радиации, магнитных полях и др. Следует иметь в виду и то, что наряду с физическими факторами в патогенезе вибрационной болезни важнейшую роль играет фактор социальный: моральная обстановка в трудовом коллективе, интерес к профессии, материальные условия жизни и др. Именно в силу своей массовости, в силу этих сопутствующих факторов новая нозологическая единица болезни, порожденная техническим прогрессом, — вибрационная болезнь — теперь стала предметом исследований медиков всех стран мира, ученых различных областей науки: физиологов, биофизиков, математиков и, как мы уже подчеркивали, социологов; эта проблема в наше время приобрела важнейшее социальное значение.

В данной книге мы касаемся лишь биологического аспекта проблемы о возможных последствиях для здо-

ровья человека и его биологической судьбы — непрерывного и все усиливающегося действия механических факторов.

### ПЕРЕНОСИМОСТЬ ВИБРАЦИИ И ЗВУКА

Существует довольно распространенное мнение, что вибрация является фактором, не столь радикально действующим на биологическую судьбу объекта по сравнению, например, с термическими и радиационными, действие которых, безусловно, приводит к гибели. Сложилось убеждение, что биологический эффект вибрации накапливается в результате длительного или многократно повторяемого ее действия. Основания для этого имеются. Насколько нам известно, еще не зарегистрировано ни одного случая смертельного исхода действия вибрации на человека. Однако при ближайшем рассмотрении механизма биологического действия вибрации смертельный исход объекта не только теоретически возможен, но уже многократно наблюдался в экспериментах на животных. Еще в 30-х гг. японский исследователь Суэда М. (1937—1939) провел обширное исследование действия вибрации на различные функциональные системы лабораторных животных. Было установлено, что низкочастотная вибрация — 140 колебаний в минуту — приводит к смертельному исходу кроликов. По данным автора, горизонтальная вибрация является более опасной, чем вертикальная.

Аналогичные результаты наблюдаются в опытах на крысах. Скорость гибели животных повышалась с увеличением амплитуды колебаний. В серии экспериментов было показано, что смертельный исход от действия вибрации наступает в результате смещений органов. Каждый орган обладает своей массой, своими динамическими свойствами, и в силу этого при вибрации животного, как, впрочем, и человека, в той или иной области возникает явление резонанса. Многими авторами было показано, что, например, вибрация человека в положении сидя вызывает резонанс при 5 Гц, стоя — при 11 Гц; голова — 20 Гц, грудь, живот — 8 Гц. Эти исследования объясняют многие явления, связанные с вибрацией: например, случаи, когда при вибрации пилот теряет способность прочитать показания прибора. Как оказалось, это наблюдается при резонансной частоте

24 Гц. Становится понятной и причина смертности животных. Чтобы исключить всякого рода нервные влияния на конечный результат вибрации, животных анестезируют, а затем подвергают вибрации. Оказалось, что лишь частоты 18—25 Гц вызывают быструю гибель мышей (анестезированных), другие частоты (выше и ниже) подобного эффекта не вызывают. Вскрытие показало, что смерть наступает от кровоизлияния в легких и желудочно-кишечном тракте. Высокая смертность крыс наблюдалась при вибрации с частотой 10—45 Гц; при гибели животных от вибрации обнаружено кровоизлияние в легких.

С теоретической и практической точек зрения представляет большой интерес серия исследований комбинированного действия вибрации и радиации. Каждый из этих факторов имеет свою мишень действия: радиация — компоненты клетки, главным образом нуклеопротеиды; вибрация — структуру клетки и субклеточных образований. В этом их специфичность действия на клетки. Однако реакция клетки, как часто можно наблюдать, кажется однозначной. Это обстоятельство дало повод к широкому выводу о существовании неспецифической реакции клетки в ответ на самые различные виды воздействия: механические, химические, радиационные и др. Но идея неспецифической реакции клеток справедлива лишь на уровне последнего этапа ее бытия — на грани жизни — паранекрозе (как и парабיוзе). Начальный этап действия этих факторов и соответствующая им реакция сугубо специфичны и представляют особый интерес для биологов. К сожалению, исследование реакций клетки и в микроинтервалах времени, и на уровне ультраструктуры в ответ на действие хотя бы этих двух факторов представляет серьезные методические трудности. Может быть, в силу этих трудностей проблема комбинированного действия разных факторов на биологические системы пока что изучена крайне слабо.

В результате исследований комбинированного действия на животных вибрации и радиации было установлено, что конечный результат комбинированного действия этих факторов зависит от интенсивности каждого из них, от последовательности действия, а также от интервала времени между факторами. Так, при облучении мышей после вибрации с частотой 70 Гц их смер-

тность повышается. Напротив, если вначале облучать животное, а потом подвергнуть его вибрации, то смертность не повышается. Что происходит в клетке после облучения, в результате которого вибрация оказывается неэффективной, — мы не знаем. Мы не знаем также, что происходит в клетке через 5 сут после вибрации, когда последующее облучение резко повышает смертность животных. Общий вывод (пока) заключается в том, что при определенных условиях комбинированное действие вибрации и радиации увеличивает смертность животных либо сокращает продолжительность их жизни. Это далеко не банальный, само собой разумеющийся вывод о том, что два фактора, конечно же, действуют эффективнее, чем один. Физиологам, однако, известны явления синергизма (совместного положительного действия двух факторов) и антагонизма (результаты действия которых противоположны). Вполне возможно, что при совместном действии вибрации и радиации могут быть случаи и синергизма, и антагонизма. К сожалению, причины этого остаются за пределами наших знаний.

Высокая смертность кошек наблюдается при вибрации их с частотами 6—12 Гц и с ускорением 15—20 g — животные не выдерживают более 20 мин. По мнению ряда авторов, смерть наступает в результате деструкции в области сердца и легких. В исследованиях на кошках применялась несколько необычная методика. Допускали возможность удара животных о стенки клетки при вибрации. Чтобы исключить эту возможность, животных погружали в сосуд с водой. Допускалась также, и вполне резонно, возможность влияния с рецепторов, и, разумеется, не только с рецепторов поверхности, но и с интерорецепторов. Для устранения и этих влияний животных наркотизировали. Условия вибрации: частота 2—50 Гц, амплитуда до 0.4 мм, время от 5 до 120 мин. Результаты опытов показали, что максимальная гибель животных наблюдается при вибрации с частотами 12 и 18 Гц и с ускорением в 15 g. Если применялась вибрация с частотой 12 Гц, животное погибало через 37 мин, а с частотой 18 Гц — через 60 мин. Интересно, что каких-либо значительных изменений в электрокардиограмме животных не наблюдалось. Наибольшие патологические изменения были обнаружены в легких. При ускорении в 15 g уже через

5 мин действия вибрации (частоты 12 и 18 Гц) в легких наблюдаются резкие изменения.

Нами также были проведены исследования переносимости вибрации животными. Мыши подвергались вертикальной вибрации с частотами от 10 до 50 Гц и амплитудой 4—6 мм. Гибель животных наблюдалась при вибрации с частотой 25 Гц. Вскрытия показали, что уже через 10 мин вибрации обнаруживаются обширные очаги кровоизлияний в печени, легких и кишечнике, что в конечном счете и является причиной гибели животных. Естественно, эта опасность увеличивается еще и под влиянием сопутствующих факторов: температура окружающей среды, газовый состав, повышенный уровень шума и другие трудно учитываемые факторы, а для человека еще и моральное состояние его, социальный микроклимат.

Летальный исход действия вибрации становится, как уже отмечалось, более вероятным при ее сочетании с влиянием других физических факторов. Так, смертность крыс от вибрации повышается с падением парциального давления кислорода, связанным с увеличением высоты над уровнем моря. Показано также, что начиная с 3000 м над ур. м. смертность крыс резко возрастает. Увеличение напряжения кислорода положения не спасает. При подъеме животных до 6000 м гибель их происходит в 100 % случаев. В одной из серий опытов исследовалась роль атмосферного давления в выносливости животных к вибрации. Оказалось, что само по себе понижение атмосферного давления не влияет на выживание животных, однако действие вибрации в этих случаях становится уже летальным. Вскрытие животных, погибших в этих условиях, показывает наличие обширных очагов кровоизлияния в различных органах.

### **ГЕНЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ И ЗВУКА**

Остановимся теперь на серии исследований, посвященных влиянию вибрации на генетический аппарат клеток. Появление этих исследований стимулировано космическими исследованиями и выполнялось в большинстве случаев в плане проблем космической биологии,

хотя, как мы увидим, действие механических факторов на генетический аппарат клетки является проблемой куда более важной в связи с изучением жизнедеятельности человека на Земле.

Академик Н. П. Дубинин и О. Л. Канавец (1962) были одними из первых, кто начал исследования генетического аппарата животных, побывавших в космосе. В 1961 г. Ю. Гагарин впервые совершил орбитальный космический полет. На этом корабле впервые в эволюции животного мира в космосе побывали плодовые мушки — дрозофилы. Исследования показали, что в их хромосомном аппарате более чем в 3 раза повысился процент нерасхождения половых хромосом. Если в контроле он составлял 0.048, то у особей, побывавших в космосе, — 0.19. Авторы исключают возможное действие радиации по двум причинам: во-первых, доза радиации ничтожно мала, в земных условиях она не вызывает подобных явлений: во-вторых, эффект действия закончился бы через 6 сут, тогда как явление наблюдалось и через 18 сут после полета. Авторы были склонны приписать этот эффект действию вибрации на активном участке полета.

Генетический анализ дрозофил, находившихся на втором корабле-спутнике, показал, что имело место статистически достоверное увеличение числа сцепленных с полом рецессивных мутаций. Было также отмечено, что сперматиды в условиях космического полета обнаруживают большее число мутаций, чем зрелые спермии. По мнению авторов, характер мутации является точковым. Высказывалось предположение, что генетический эффект полета может быть связан с действием вибрации и ускорения. Позднее, проведя те же генетические исследования на дрозофилах после полета объекта на космических кораблях «Восток-2», «Восток-3» и «Восток-4», не обнаружили эффекта сцепления с полом рецессивных летальных мутаций. Авторы с достаточным основанием отрицают влияние всех динамических факторов: перегрузки, вибрации, невесомости. Ранее наблюдаемый ими эффект мутаций, сцепленных с полом у дрозофил, возможно, был вызван тяжелой компонентой космической радиации.

Мы не будем приводить доводы за и против аргументации авторов. Отметим лишь малую вероятность молчаливого предположения авторов, что на всех спут-

никах и кораблях динамические и другие факторы, сопутствующие полету, были совершенно идентичными. Нам кажется особенно маловероятным, с точки зрения механики, чтобы на кораблях разной массы и различных по деталям конструкций параметры вибрации оказались совершенно одинаковыми. Но если динамические характеристики на разных кораблях различны, то и эффект их биологического действия должен быть различен.

Проведена серия цитологических исследований возникновения доминантных летальных мутаций у дрозофил, находившихся на корабле-спутнике. Установлено, что у лягушек в гаметах, находившихся во время полета на стадии зрелых спермиев, изменений в частоте возникновения мутаций нет. Однако если гаметы находились на стадии сперматид, то наблюдается статистически достоверное увеличение числа мутаций. Далее, аналогичное исследование проводилось в земных условиях, объект подвергся вибрации с частотой 70 Гц и амплитудой 0.4 мм в течение 15 мин. Результаты оказались положительными, наблюдается достоверное увеличение числа доминантных летальных мутаций, причем эффект имел место как на сперматиде, так и на зрелых спермиях. Касаясь причин гибели яиц у самок, оплодотворенных самцами, подвергавшимися действию комплекса факторов космического полета, отмечают возможность нарушения мейоза, в частности нерасхождения хромосом были предприняты специальные исследования для выяснения возможности возникновения под влиянием вибрации кроссинговера. Полученные данные подтверждают факт повышения кроссинговера под влиянием вибрации примерно на 0.3 %. Было исследовано и комбинированное действие вибрации и гамма-облучения, что в некотором роде имитирует условия космического полета. Результаты оказались весьма любопытными, хотя пока и малопонятными. Если подвергать объект вначале вибрированию, а затем — облучению, то число перекрестов повышается в среднем на 0.27 %. Если же, наоборот, вначале воздействовать облучением, а затем — вибрацией, то кроссинговер увеличивается на 0.68 %. Эффект увеличивается и в случае комбинированного действия вибраций и ускорения. Были проведены цитологические исследования клеток костного мозга и селезенки мышей, на-

ходившихся на втором корабле-спутнике. Исследования проведены на 2-е, 3-и, 5-е, 9, 30 и 60-е сутки после полета. Было обнаружено увеличение числа хромосомных нарушений. Так, в контроле спонтанные хромосомные нарушения в среднем составляют 3.16 %, а через двое суток после полета — 7.12 %, через трое — 8.36 %, через пять — 7.88 %, через девять — 7.96 %, через 30 — 10.78 % и через 60 суток — 7.63 %. Поражает длительность эффекта после действия, причем до 30 сут наблюдается хотя и незначительное, однако заметное наращивание эффекта. Авторы пытались выяснить, какой из всего комплекса фактор наиболее эффективен. По их мнению, радиацию следует исключить, так как она была в пределах нормы и не могла вызвать заметного биологического эффекта. Авторы склонны были приписать решающую роль в действии на ядерный аппарат клетки механическим факторам, и в первую очередь вибрационному. Для проверки справедливости этого утверждения аналогичные опыты проведены в земных условиях.

Подвергая мышей вибрации частотой 70 Гц с амплитудой 0.4 мм в течение 15 мин и повторяя интервалы времени исследований те же, что и в случае после действия космического полета, провели цитологические исследования на 2, 5, 9-е и 3-и сутки после вибрации. Было обнаружено слипание хромосом на стадии анафазы. Если спонтанное слипание хромосом составляет 5.7 %, то через 30 мин процент слипания повышается до 10 %, через час — до 16, а через сутки — до 20 %. Далее идет постепенное уменьшение. Однако на 30-е сутки процент слипания все еще остается повышенным. Кроме слипания хромосом наблюдается нарушение хромосом типа мостов, иногда даже наблюдалась фрагментация. Аналогичные явления слипания хромосом наблюдались после вибрации и в клетках селезенки. В контроле спонтанные слипания составляют около 2 %, а после вибрации — до 20 %. Эти исследования, проведенные в земных условиях, дают основание говорить о том, что вибрация, по-видимому, является одной из главных причин указанных изменений.

Это были первые цитогенетические исследования, связанные с космическими полетами. Естественно, выводы нуждались и до сих пор еще нуждаются в тщательной проверке, так как их категоричность настояра-

живает исследователей, и, будь они достоверными, они не могут не вызвать озабоченности ученых за биологическую судьбу не только космонавтов, но и прежде всего человека в земных условиях.

Дальнейшие цитологические исследования, проведенные на тех же объектах, были посвящены проблеме совместных действий вибрации с другими физическими факторами — радиацией и ускорением.

В плане космических исследований несомненный интерес представляют исследования комбинированного действия вибрации и радиации. Изучали комбинированное действие облучения дозой 50 и 100 р и вибрации 60 и 70 Гц и амплитудой 0.25 мм. Мыши подвергались вибрации как до, так и после облучения. Пожалуй, наиболее оригинальным из этих исследований следует считать тот факт, что вибрация ослабляет эффект действия радиации. Так, облучение вызывает нарушение митоза в 47.23 % случаев, а при вибрации, сочетанной с облучением, — только в 33.55 %. Однако частота слияния хромосом при совместном действии вибрации и радиации увеличивается по сравнению с данными, полученными при действии этих факторов порознь.

Заслуживает внимания тот факт, что обнаруживается защитный эффект вибрации от радиации, но только в том случае, если вибрации подвергается животное сразу после облучения. Этот эффект уже не обнаруживается, если вибрировать животных через 24 ч после облучения. Если вначале вибрировать, затем облучать, то эффект кажется более выразительным: снижение частоты хромосомных перестроек при одном облучении составляет 11.4 %, а с предварительной вибрацией — лишь 7.1 %.

Проведены исследования митотической активности и хромосомных перестроек в клетках костного мозга мышей, подвергавшихся вибрации (частота 35 и 70 Гц, амплитуда 0.4 мм) в течение 15 и 60 мин.

Исследования проведены через 30 мин, 4 ч, 1, 2, 5, 10 и 30 сут после вибрации. Как оказалось, в большинстве случаев достоверный эффект действия вибрации наблюдается лишь при применении частоты 70 Гц. Митотическая активность угнетается уже через 30 мин после вибрации, остается пониженной в течение последующих 10 сут. Наряду с митозами исследовалось число хромосомных перестроек: появление мостов,

фрагментация, слипания. Здесь отмечены следующие явления. Через 30 мин после четырехчасовой вибрации наблюдается достоверное число хромосомных нарушений; далее, через сутки, число нарушений оказывается в пределах нормы, однако через 2 и 5 сут вновь достоверно повышалось. Проявляется волнообразный характер реакции на действие вибрации.

Остер (1968) помещал личинки дрозофил на американский биосателлит, находящийся в полете 42 ч. Во время полета личинки искусственно облучали гамма-радиацией в несколько сот раз. Такой же дозой облучалась контрольная проба на земле. Исследования показали, что если личинки, находившиеся на биосателлите, были на ранней стадии зрелости, с многими делящимися клетками, с интенсивным метаболизмом, то созревание особи ускоряется; наблюдаются разрывы хромосом, повышается частота рецессивных мутаций, чаще наблюдается нерасхождение хромосом. В личинках более поздней стадии зрелости аналогичных изменений либо не наблюдается, либо они менее выражены. Авторы склонны отдать предпочтение из всего комплекса факторов полета — невесомости. Однако каких-либо серьезных доказательств в пользу этого нет.

Для генетических исследований, связанных с космическими полетами, широко используются бактерии и дрожжи. Так, исследовали лизогенные культуры кишечной палочки штамма K-12 и культуры клеток человека (фибробласты), пробы которых находились на космических кораблях «Восток»-2, -3, -4, -5 и -6. Обычно в земных условиях при облучении дозой до 500 р лизогенные бактерии образуют инфекционные фаги. Однако на кораблях «Восток» интенсивность радиации была примерно на 2 порядка ниже. Тем не менее образование лизогенного фага имело место.

Следует отметить два заслуживающих внимания факта: во-первых, вибрация и затем облучение вызывают более сильный эффект, чем при таких же дозах воздействия, но в обратной последовательности — облучение, затем вибрация. Создается впечатление, что последующая вибрация несколько защищает объект от радиации. Во-вторых, во всех случаях эффект вибрации не зависит от частоты, из чего следует, что в данном случае вибрационный фактор выступает лишь как неспецифический, вызывая какое-то начальное изменение

структуры. Подводя итог генетическим исследованиям в космосе, Я. Л. Глембоцкий (1970) приходит к выводу о том, что при полете в космос генетический эффект несомненно имеет место в разных объектах, как на растениях, так и на животных. Однако причиной тому является радиация, динамические же факторы космического полета играют ничтожно малую роль, оказывая влияние главным образом на нерасхождение хромосом.

В итоге разбора данных, касающихся генетического эффекта действия факторов космического полета, приходится пока констатировать, что они привлекали внимание исследователей к необходимости изучать биологическое действие вибрации, однако не дали сколь-нибудь значительных результатов для понимания природы действия этого фактора. При решении вопроса о возможности генетического действия механических колебаний следует помнить основное условие для возникновения эффекта — это зависимость от метаболизма, который и определяет реализацию генетической программы.

Вопрос о действии механических факторов, в том числе и динамических факторов космических полетов, на биологию человека является важнейшим в современной биологии. От его решения зависит дальнейший ход исследований не только в области космической, но в еще большей степени земной биологии, ибо биологическая судьба человека определяется не в космосе, а на своей альма матер — Земле.

До сих пор мы обсуждали проблему биологического действия вибрации и звука, возникающих как на производстве, так и в быту (транспорт, уличное движение, работа бытовой техники и др.). Но есть и еще источник вибрации и звука, неизмеримо более мощный, глобального масштаба, который угрожает биологической судьбе человека — это землетрясение. Теперь, в дни трагических событий, связанных с землетрясением в Армении 7 декабря 1988 г., проблема биологического действия звука и вибрации геологического происхождения особенно остро встала перед учеными. Нельзя недооценивать опасности как самого землетрясения, так и биологического действия возникающих при этом вибраций и звука. Для человечества землетрясение несет двойную опасность: во-первых, опасность массовой гибели людей. Каждое землетрясение средней силы (6—7 бал-

лов) уносит десятки тысяч жизней, а жертвы более сильных (8—9 баллов) уже исчисляются сотнями тысяч. При этом следует учесть, что землетрясений разрушительной силы на нашей планете регистрируется ежегодно до 1000, а всего сейсмических толчков насчитывается до 100 млн. ежегодно. К этому следует добавить, что землетрясения (особенно сильные) захватывают обширные по площади районы. Так землетрясение в Северном Тянь-Шане в 1911 г. охватило площадь до 4 млн. км<sup>2</sup>.

Во-вторых, само действие на человека звука и вибрации в условиях землетрясений по характеру совершенно иное, не сравнимое с их действием в условиях производства или в бытовых условиях. Дело в том, что при землетрясении к действию вибрации и звука прибавляется один из самых могучих биологических факторов — страх. Мы уже отмечали, что биологический эффект действия звука и вибрации в условиях НТР усиливается рядом сопутствующих факторов (сильные колебания температуры, физические нагрузки и др.), но они по своему действию не идут ни в какое сравнение со страхом — инстинктом самосохранения.

Применительно к животному миру мы можем с уверенностью говорить, что основная его реакция на землетрясение продиктована страхом. Для такого утверждения имеется достаточно данных. Уже в глубокой древности люди обратили внимание на необычное поведение животных при землетрясении. Так, летопись свидетельствует, что в 328 г. до нашей эры землетрясением был разрушен город Геликос (Греция), а за несколько дней до этого события из нор разбежались ласки и кроты. Общий характер реакции животных заключается в невиданном в обычных условиях возбуждении, которое сопровождается столь же необычным поведением. При землетрясении в Скопье (Югославия, 26 июля 1953 г.), по свидетельству сторожей в зоопарке, звери неистово выли, метались по парку, их охватила дрожь. . .

Трудно сказать, какой класс животных и какой среды обитания (суша, вода) более чувствительны к землетрясению. Можно было бы ожидать большей чувствительности к механическим колебаниям у пресмыкающихся, в частности у змей, которые ощущают движения животного, шаги человека на расстоянии

10—15 м. Но каких-либо доказательств их более высокой чувствительности нет. Единственно, что может говорить об их особой реакции на землетрясение — это наличие чувствительности даже в период их зимней спячки. Значит, землетрясение способно «пробудить» животное, изменить его функциональное состояние.

Высокая степень возбужденности проявляется у собак: дикое, надрывное завывание, бессмысленные поиски чего-то неясного. Комнатные собаки часто рвутся на свободу. Известен случай, когда собака вынесла ребенка из дома, чем и спасла его от гибели.

Насекомые так же, как и другие животные, ощущают своеобразную атмосферу грядущего землетрясения. Пчелы, возбужденные, с интенсивным жужжанием покидают ульи. Муравьи покидают свой «дом» — муравейник. Часто наблюдается появление необычной для данной местности стаи саранчи. Птицы, как домашние, так и дикие, также проявляют необычное поведение в «предчувствии» землетрясения.

Широко известно поведение рыб и других морских животных перед и в момент землетрясения. Часто косяки рыб всплывают на поверхность моря, наблюдается их стремление к побережью. Были случаи, когда акулы выбрасывались на берег, появлялись необычные для данного региона виды рыб, других морских животных. Особенно отличаются своим поведением морские коты. Японские ученые высоко оценивают их сейсмочувствительность.

В настоящее время едва ли можно сомневаться в способности животных предчувствовать грядущую опасность — землетрясения. Причем это предчувствие не мистика, оно имеет реальное объяснение. Физическое проявление землетрясения — это механические толчки, которые могут достигать чудовищной силы. Эти толчки, или вибрация субстрата (Земли), являются основной механической силой, действующей на живой объект. Но толчков, колебаний, которых нет, предсказать нельзя. Следовательно, какие же другие физические явления, кроме механических толчков, сопровождают землетрясение? Такие явления есть и они возникают до появления механических толчков. Речь идет об инфразвуковых колебаниях, а также о колебаниях электромагнитной природы. Эти виды колебаний современные приборы регистрируют. Но ни у человека, ни

у большинства животных рецепторов, способных их воспринимать, нет, хотя биологическое действие этих колебаний несомненно. Например, инфразвук, которого мы не слышим, числится в меморандуме ООН как оружие массового уничтожения людей. Магнитные бури, потоки электромагнитных волн связаны с изменением солнечной активности, влияют на урожай, на распространение эпидемий, на формирование косяков рыб. . . Словом, действуют на все многообразие жизни на нашей планете. Но рецепторов для восприятия всех этих видов колебаний у человека нет. Может быть, поэтому и возникают всякого рода загадки мира, типа загадки Бермудского треугольника. Теперь уже наука имеет все основания считать, что предчувствие животными землетрясений — не загадка природы, а вполне научно обоснованное явление.

Оценивая поведение животных при землетрясении, исследователи приходят к выводу, что конечный характер реакции определяется (диктуется) инстинктом самосохранения. В основе поведения лежит реакция страха.

А как у людей? Каково поведение человека? Едва ли есть основание утверждать, что чувство страха для него чуждо! Часто в экстремальных условиях именно страх определяет его поступки, его поведение. Его основа биологическая, и она не может не быть подвластной основному биологическому закону. Именно в этих условиях, как теперь известно, наблюдается ряд патофизиологических процессов: сердечные приступы, инфаркты, инсульты, гипертонические кризы, эпилептические припадки, психозы. . . Чем они вызываются? Вероятно, также страхом. . . У человека страх фиксируется в его памяти как своеобразный условный рефлекс. Так, в день сильного землетрясения в Ташкенте в 1966 г. число вызовов скорой помощи, главным образом по поводу сердечных приступов, резко возросло. Это — плоды страха перед стихией. Ровно через год, в те же календарные числа, никакого землетрясения не было, но число вызовов скорой помощи снова увеличилось. Что это? Результат фиксированного памятью страха? Вероятно, да! Условный рефлекс минувшей трагедии.

Перед биологами и врачами стоит задача изучить все возможные реакции человека, оказавшегося в столь трагических условиях, чтобы в будущем не дать ему

подчиняться власти страха и сделать все возможное для его спасения.

«Когда-нибудь человек должен будет бороться с шумами так же, как он боролся с чумой и холерой» (Кох). Эти слова знаменитого микробиолога были опубликованы эпиграфом к главе о шуме в книге, изданной в 1977 г. чехословацкими авторами под многозначительным названием «Троянский конь цивилизации».

О вредном действии вибрации академик А. А. Благонравов сказал: «Проблема, рожденная современной научно-технической революцией, представляет собой часть общей очень сложной социальной проблемы взаимодействия человека с окружающей его внешней средой, как существующей независимо от деятельности человека, так и средой, обусловливаемой такой деятельностью».

Итак, к множеству биологических и социальных зол, веками подстерегавших человека, на вершине его цивилизации прибавилось еще одно — шумы и вибрации.

В первой главе мы привели данные о биологическом действии звука и вибрации и показали, что эти факторы являются не только постоянными спутниками животных и человека, но и биологически необходимыми для них. Во второй главе были представлены сведения о патологическом действии тех же факторов. Мы рассмотрели также причины, которые приводят к тому, что биологически необходимые факторы становятся биологически опасными. Теперь уже хорошо известно не только ученым — врачам и биологам, но и широкому кругу читателей, что вибрация и звук приносят вибрационную и шумовую болезни, массовые психические заболевания; что число заболеваний от вибрации и шума стало намного опережать число всех профзаболеваний. Эти болезни становятся уже социально-опасными. Не исключено, что действие механических факторов способно нарушать и генетические структуры. Каковы же возможные последствия для человека, пусть в отдаленном будущем, систематического воздействия этих факторов?

Мы изложили в достаточно общем виде материалы наблюдений и экспериментальные данные, касающиеся биологической роли и патологического действия вибрации и звука. Но это лишь малая доля сведений, имеющих в литературе о повреждающем действии этих

факторов, связанных с трудовой деятельностью человека. В век НТР техническое оснащение не только производственных процессов, но и быта человека стремительно возрастает, и, как тень этого прогресса, резко возрастает число заболеваний вибрационной болезнью, неврозами, связанными с шумами на производстве и в быту.

О патологическом действии этих факторов, как уже подчеркивалось, имеется обширная литература. Однако вызывает удивление, что до сих пор нет ни одного специального исследования механизма их биологического действия. Делается, правда, попытка объяснить биологическое действие вибрации с позиции учения академика А. А. Ухтомского об усвоении ритма (Л. В. Охнянская и др., 1987). Высказано также предположение о роли резонансных явлений во взаимоотношениях механических колебаний с биологическими структурами. Однако это лишь подходы к объяснению механизма действия. У нас в стране эту проблему изучает Институт механики Академии наук СССР во главе с К. Фроловым. Проводятся интенсивные исследования физической природы этой проблемы: характеристика, механизмы действия, способы измерения, технические средства защиты от вибрации и др. Но эти исследования больше касаются профилактики вибрационной болезни, а не механизма ее возникновения. Увеличение заболеваний от действия вибрации и звука вызывает настоятельную необходимость специального исследования механизма возникновения патологии на всех уровнях биологических объектов: молекулярном, клеточном, организменном. Это комплексная проблема для биохимиков, физиков, врачей, биологов, биосоциологов.

При исследовании механизма действия вибрации необходимо учитывать особенности факторов, вызывающих вибрационную болезнь. Прежде всего источником патологии являются механические колебания. Характер этого фактора определяет эффективность его биологического, а при определенных условиях — патологического действия. Вибрация, как известно, характеризуется (в частности) переменным давлением, и мы уже приводили данные о том, что переменное давление по эффективности биологического действия в тысячи и миллионы раз выше, чем давление постоянное. адре-

сатом действия механических колебаний является биологическая структура объекта. Следовательно, при исследовании механизма патологического действия вибрации необходимо прежде всего определить характер и степень деформации структуры, что может быть показателем начинающегося патологического процесса.

Вторая особенность источника патологии (вибрации) характеризуется возможностью при определенных условиях возникновения резонанса. Известно, что при возникновении резонанса резко возрастает амплитуда колебаний, что несомненно сопровождается деформацией структуры объекта. В сущности наличием резонанса и объясняются не только появление глубоких патологических процессов, но даже и смертельные исходы. Организм по своей структуре гетерогенен и при тотальной вибрации — каждая из структур подвергается также вибрации с задаваемой частотой. Но каждая структура обладает, в силу физических законов, и своей собственной (внутренней) частотой. Следовательно, в любой структуре при определенных условиях возникнет резонанс, и он дает начало патологическому процессу — вибрационной болезни. Нами экспериментально было показано (Романов, 1983), что явление резонанса под влиянием вибрации возникает в объектах любого уровня организации жизни — от изолированного нативного белка до организма. Именно этим и можно объяснить полиморфный, множественный характер вибрационных болезней.

Наряду с физической природой источника болезни следует подчеркнуть значение функционального состояния объекта. Речь идет о стационарном возбуждении как отдельных тканей, так и организма в целом. Именно это исходное функциональное состояние, наличие доминантных явлений в организме и определяют конечный результат действия вибрации; один и тот же характер вибрации вызывает различные последствия в зависимости от состояния объекта.

Данные, с которыми читатель познакомился в предыдущей главе, свидетельствуют не только о возможной, но и о реально существующей опасности для биологической судьбы человека таких, казалось бы, житейски обычных факторов внешней среды, как звук и вибрация. Парадокс этого явления заключается в том, что звук и вибрация оказываются одновременно и биологически вредными, и биологически необходимыми. Этот парадокс не следствие биологической эволюции, а явление биосоциальное, и борьба с ним также является проблемой биосоциальной. Двойной термин указывает не только на двойственную природу проблемы, но соответственно и на совместное участие обеих этих сторон (биологической и социальной) в преодолении данного парадокса, в борьбе с биологической опасностью действия звука и вибрации.

Эта книга посвящена биологической проблеме действия механических колебаний. Естественно, что, рассматривая возможные пути ее решения, мы касаемся главным образом биологической стороны вопроса, и лишь в силу необходимости затрагиваем, в меру своей компетентности, и сторону социальную. Итак, в чем же заключаются все-таки суть и сложность этой биосоциальной проблемы? Что выпадает на долю биологии и какие сугубо биологические законы гарантируют успех в борьбе человека с пагубным действием данных физических факторов среды? Суть проблемы не требует дополнительных пояснений, она подробно изложена выше. Речь идет о тех биологических законах и принципах, которые человек может и обязан использовать, чтобы превратить патологически действующие факторы в биологически полезные.

Одним из фундаментальных законов биологии является закон, касающийся взаимоотношений живой материи со средой, ее окружающей. Основные требования этого закона направлены на сохранение 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. Способность оценивать характер действия факторов внешней среды и, в случае необходимости, проявлять такую реакцию, которая обеспечит нормальную жизнедеятельность, — является уникальным свойством живой материи. Этим свойством обладают живые системы всех уровней организации — от клеток простейших до человека.

Чем же достигается эта биологически целесообразная реакция на действия факторов внешней среды? Судя по характеру этих реакций, укажем на три способа, с помощью которых достигается реакция самозащиты: 1) в ответ на действие того или иного фактора, как первичная реакция, повышается резистентность системы в результате активации метаболизма; 2) устойчивость (резистентность) системы повышается в результате способности к адаптации; 3) целостность системы (клетки, организма) сохраняется в результате способности поврежденных функциональных частей организма к репарации. Все эти пути повышения жизнеустойчивости живых систем к действию различных, в том числе и экстремальных, факторов в настоящее время являются предметом интенсивных исследований, для обзора которых требуется уже специальная монография. В нашу задачу не входит анализ механизмов, с помощью которых жизнь защищает себя, повышая устойчивость организмов, укажем лишь на некоторые особенности этого явления.

Вероятно, все живые объекты, при прочих равных условиях, обладают своей исходной, только им присущей резистентностью, как надо полагать генетически заданной. По мере усложнения биологических структур появились новые способы повышения устойчивости к действию неблагоприятных факторов среды. К ним относятся бесконечные морфофункциональные приспособ-

собления. Поверхности организмов защищаются от механических повреждений, действий химических веществ, температуры и т. п. Живая материя обладает могучей силой — и не только для сохранения своего бытия! Пользуясь антропоморфной терминологией, можно сказать, что этот вид материи (жизнь!) стремится завоевать пространство. Жизнь за ничтожно малый геологический период стала самой мощной геохимической силой планетарного масштаба. Биосфера, по мнению академика В. И. Вернадского, это активная форма материи. И действительно, одна бактерия, например за 4, 5 сут, может дать  $10^{36}$  поколений с массой, равной океану. Способы размножения, сохранения потомства, сохранения своего бытия с помощью периодического анабиоза — все это вырабатывается в процессе эволюции для повышения устойчивости к экстремальным факторам, для самосохранения живой материи.

И еще один биологически не менее значимый способ защиты жизни от губительного действия внешних факторов — это способность к репарации, самопочинка поврежденных деталей. Мысль о возможности репарации одним из первых была высказана нашим соотечественником В. П. Парибоком. Речь шла о репарации поврежденных участков ДНК ионизирующими излучениями. Суть дела, конечно, не в том, чем повреждена та или иная система, а в способности к самоизлечению, в восстановлении утраченных структур и функций. Все каналы повышения устойчивости (выносливости) к действию повреждающих факторов свидетельствуют о способности этого вида материи (живой), по крайней мере в пределах нашей планеты, преодолевать препятствия, интенсивно завоеывая пространство, преобразуя лик Земли.

По мнению академика А. А. Ухтомского, возбудимые ткани, как вероятно и все живые системы, функционируют не на пределе своих возможностей, а в определенном оптимуме, что энергетически более выгодно. В живых системах всегда сохраняется возможность в случае необходимости повысить уровень функциональной активности. Так что вслед за первым раздражением возникает ответная реакция, направленная на стимуляцию соответствующих процессов (например, метаболических), которые в случае повреждения обеспечивают устойчивость объекта к последующим, более

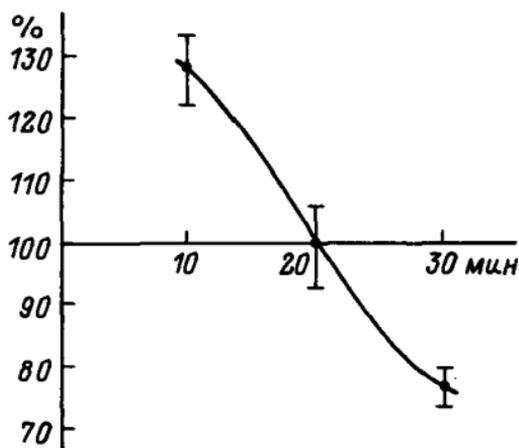


Рис. 10. Двухфазное изменение АТФазной активности.

*По оси абсцисс — продолжительность вибрации (мин); по оси ординат — активность (%).*

сильным раздражениям. Следовательно, первичное раздражение стимулировало способность выдержать более сильное последующее раздражение. Но эта стимуляция, как показано в школе Введенского—Ухтомского, должна быть оплачена дополнительной энергией за счет активности метаболических процессов. Раздражение, способное вызвать активацию метаболизма, и соответственно повысить резистентность, обычно обозначают термином «стимуляция».

Явление стимуляции в биологии уже хорошо известно и наблюдается на объектах всех уровней организации от клетки до организма животных и человека. Важно при этом подчеркнуть, что стимуляция как реакция на раздражение не зависит от природы раздражителя. Она может быть вызвана самыми различными физико-химическими факторами внешней среды. Известный радиобиолог А. М. Кузин (1977) приводит обширную сводку данных о стимулирующем действии даже таких, казалось бы особо биологически опасных, факторов, как радиация.

Реакция живых объектов на раздражения носит двухфазный (рис. 10), иногда даже ритмический характер (рис. 11). Одна из фаз этой реакции и является фазой стимуляции, она может быть и в начале реакции, но может быть и в другие периоды действия раздражи-

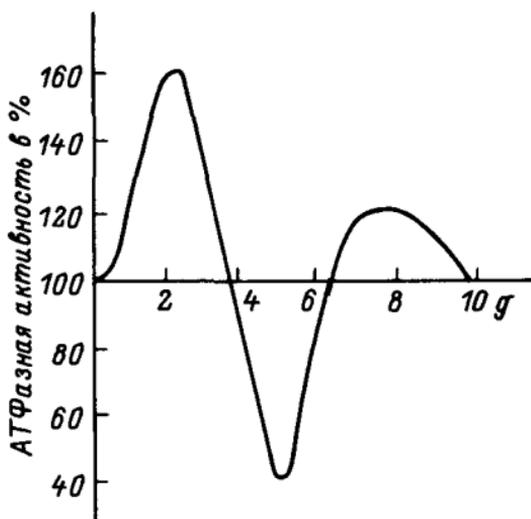


Рис. 11. Изменения АТФазной активности при возрастании вибрации.

По оси абсцисс — интенсивность; по оси ординат — АТФазная активность (%).

теля. Это зависит от интенсивности и длительности его действия. Содержанием понятия *стимуляция* являются: активация биологических процессов, повышение устойчивости (резистентности) объекта, репарация структурных нарушений. Стимуляция — это неотъемлемое свойство только живой материи. В процессе эволюции оно приобрело многообразные формы своего проявления. Этот бесценный дар природы и должен быть использован в борьбе за биологическое благополучие человека.

При оценке взаимоотношений объекта с раздражителем необходимо иметь в виду наличие так называемого оптимума раздражения. Речь идет о таком по интенсивности и продолжительности раздражении, реакция на которое биологически целесообразна и даже необходима. Мы уже отмечали, что из бесконечного спектра всех видов энергии рецепторы человека воспринимают лишь ничтожно малую область этих спектров. В общебиологическом аспекте это и есть оптимум раздражений для живой материи на нашей планете. Разумеется, в индивидуальной жизни особи (в том числе и человека) формируется свой оптимум раздражения, обеспечивающий его биологическое благополучие. Раздражители вне оптимума, например сверх-

мощная какофония звуков рок-музыки, могут вызвать лишь патологию. Напротив, природные звуки — шум дубрав, гомон птиц, звуки речи — являются необходимым, обязательным компонентом человеческого бытия, это его извечные спутники в процессе эволюции.

Итак, судя по литературным данным о биологическом действии самых различных по своей физико-химической природе факторов, складывается убеждение, что все, именно все факторы так называемой внешней среды, в условиях действия которых, или, лучше сказать, при взаимодействии с которыми существует жизнь, — являются стимуляторами ее процессов.

С биологической (энергетической) точки зрения едва ли целесообразно на каждый из действующих факторов внешней среды вырабатывать отдельный механизм повышения резистентности. Скорее, следует предположить, что взамен всех видов раздражения в процессе эволюции должен быть создан механизм (способ, инструмент), повышающий устойчивость тканей к повреждающим действиям любого фактора.

В своих исследованиях мы пришли к выводу, что одним из таких «инструментов» является биологически активное вещество тироксин, гормон щитовидной железы. Общий итог наших исследований заключается в следующем: 1) под влиянием тирокина резистентность мышц к высокой температуре повышается; 2) повышается способность клеток освобождаться от чуждых им веществ; 3) повышается интенсивность дыхания; 4) реакция на тироксин носит двухфазный характер.

Несомненно, в процессе эволюции и на различных уровнях организации живых структур, конечно же, вырабатывались все новые и новые формы самозащиты, формы борьбы за свое бытие. И действительно, живые структуры в процессе эволюции создали обширный арсенал средств и механизмов для защиты от вредных воздействий, таких как тироксин, пенициллин, естественные антибиотики, различные формы иммунитета. За последние два с лишним десятилетия найден и интенсивно изучается еще один (и, надо полагать, не последний) мощный биологически активный фактор — интерферон. Этот фактор, вероятно, видоспецифичен и способен защищать организм не только от разрушающего действия вирусов, но, может быть, и от дру-

гих факторов, угрожающих целостности и жизни данного объекта. Живое вещество располагает бесчисленными формами адаптации: от моментальных реакций повышения метаболической активности до крайнего ее подавления (диапаузы; анабиоз, имитирующий смерть), позволяющего тысячелетиями сохранять жизнь. Все подчинено основному биологическому закону — *быть!* Способ репродукции, дающий возможности в считанные часы покрыть планету живым веществом, также является проявлением основного биологического закона.

Рассматривая под этим углом зрения явления жизни, становится в особенности понятной гениальная мысль нашего соотечественника академика В. И. Вернадского, что живое вещество — это активная форма материи, именно активная, способная преобразовывать не только лик нашей планеты, но, вероятно, и другие миры Вселенной.

Как видит читатель, вопрос о биологической стимуляции о резистентности, способности выдержать натиск сверхвысоких скоростей, сверхвысоких мощностей, которые принес нам XX век и научно-техническая революция, — этот вопрос является фундаментальным в биологии.

Было бы крайне интересно составить такой каталог возможных средств, которыми пользуется живая материя, преодолевая всевозможные препятствия. К сожалению, мы не располагаем подобными данными и предлагаем читателю лишь общий принцип реакции на действие раздражителя любой природы.

Этим введением нам хотелось показать, что жизнь, ее различные формы существования (в том числе человек) обладают обширным арсеналом способов «постоять за себя», противостоять пагубному действию самых различных факторов внешней среды, в том числе (что нас особенно интересует в данном случае) действию вибрации и звука. Задача ученых заключается в том, чтобы познать основные закономерности реакции клеток, тканей, организма на действия этих факторов, исключить возможность их патологического действия и по возможности использовать их в интересах человека.

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПОТРЕБНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Потребность в механической энергии является фундаментальным свойством только живой материи.

Законы природы мстят человеку за его невежество, но, понятые, они становятся его могучим союзником. Эта истина подтверждается всей многовековой практикой человека. Она касается всех явлений физического мира, всех видов энергии, в том числе, разумеется, и энергии механических колебаний. В природе нет и теоретически немыслимо существование такого вида энергии, действие которого было бы несовместимо с жизнью на Земле. Догадка философов древности о единстве мира подтверждена всем ходом развития естествознания. Элементы живой материи — те же элементы Вселенной. Виды энергии, действующей на живую материю в земных условиях, те же, что и в других мирах Вселенной.

Следовательно, в условиях наличия всех видов энергии зарождалась, развивалась и ныне существует живая материя на Земле. Из этого также следует, что в мире нет таких видов энергии, которые были бы чужды жизненным процессам в земных условиях. Напротив, как мы уже отмечали, механическая энергия звука и вибрации в определенной степени необходима для жизни.

К сожалению, проблема необходимости действия различных видов энергии для биологических систем до сих пор не является предметом исследований, и, насколько нам известно, такой проблемы в биологии нет. Между тем она должна быть! Ее необходимость может быть постулирована именно тем, что жизнь развивалась в условиях действия всех существующих в природе видов энергии. Дефицит того или иного вида энергии непременно будет сказываться на биологических процессах. Например, недостаточная освещенность полярных районов нашей планеты оказывается далеко небезразличной для биологии животных и человека.

Нас в данном случае интересует дефицит механической энергии, поскольку развитие жизни на Земле шло в условиях постоянного действия механических колебаний.

Механическая энергия в виде теплового (броуновского) движения проявляется в самой основе жизненных процессов. Животный мир любого уровня организации от одноклеточных до высших животных и человека нуждается в генерации механической энергии для осуществления самых различных процессов жизнедеятельности. Потребность (необходимость) в механической энергии и была причиной появления в процессе эволюции структуры, способной генерировать этот вид энергии. Такой структурой является мышца. Структуры, способные генерировать механическую энергию, наблюдаются на самых ранних этапах эволюции.

Хотя книга посвящена проблеме действия звука и вибрации и непосредственно не связана с мышечной тканью, однако речь идет о механической энергии, биологическая роль которой нас интересует. Поэтому необходимо отметить особенности мышцы как источника и носителя механической энергии.

Мышца — это уникальное и ни с чем не сравнимое творение природы не только потому, что при определенных условиях она сама себя обеспечивает механической энергией. Но, может быть, биологически еще более важной особенностью ее является потребность в механической деятельности. Мышца, лишенная возможности проявлять только ей присущую деятельность, уже перестает быть носителем жизни. В этих условиях все процессы, связанные с мышечной деятельностью, перестают функционировать, система становится обреченной. Такую опасность для себя человек давно уже заметил.

Дефицит движения, гиподинамия (гипокинезия) — явление биосоциальное. Его причины социальные. Дефицит движений человека связан с образом его жизни, новыми производственными условиями, с его трудовой деятельностью, когда мускульная энергия заменяется энергией внешней. Гиподинамия — одна из издержек современной цивилизации, негативная сторона НТР. Важно осознать и отдать себе отчет, что с дальнейшим развитием НТР гиподинамия будет непрерывно расти, угрожая пока еще трудно предсказуемыми последствиями в биологической судьбе человека. С точки зрения эволюции живой материи это явление парадоксальное, противоестественное. Жизнь есть движение, и не только

в философском понятии, но и в сугубо физическом смысле.

Вопрос о причинах гиподинамии, о ее последствиях для человека будет рассмотрен ниже. Здесь целесообразно остановиться на причинах, побуждающих мышцы к деятельности. Казалось бы, в этом нет ничего загадочного. Например, действие различных физико-химических факторов вызывает у мышцы ответную реакцию в виде периодических сокращений. В простейшем случае это так и есть. Мышца, в силу своей природы, должна совершать работу в каком-то определенном ритме. Но для этого должен быть постоянно присутствующий раздражитель, которым в принципе может быть любой физико-химический фактор: свет, температура, электрический ток, химический, механический. Создается взаимозависимая ситуация: мышцы нуждаются в постоянном действии, действие же вызывается постоянно присутствующим раздражителем. Возможно ли такое состояние в живых системах, когда потребность в действии мышцы имеется (как и положено ей по природе), а стимулятора этого действия нет? Раздражителя нет, а мышца сокращается?! Может быть, в силу своего невежества, это сокращение мы называем самопроизвольным. Но что это значит — сокращение мышцы без причины? Явлений без причин не бывает. Скорее, сокращение без видимых причин, о которых мы мало или почти ничего не знаем. Конечно же, периодические, иногда со строгой ритмикой сокращения есть, причины их реально существуют, но о них мы мало что знаем.

Одна из возможных причин самопроизвольного сокращения мышц заложена в самой мышце. Именно потребность в деятельности и является причиной этой деятельности. Физиологам хорошо известен самопроизвольный тремор мышц. Часто мышцы и ин витро, и ин ситу при низких температурах начинают сокращаться в определенном ритме. Этот тремор сопровождается повышением температуры, целесообразной реакцией для данного объекта. В этом случае потребность в активном движении мышцы и является раздражителем. Самораздражение или, что то же, самовозбуждение — исключительное явление в биологии, присущее только живым объектам. Оно, возможно, свойственно живому всех уровней организации, от клетки организма про-

стейших до человека. Человеку понятно самовозбуждение самого человека, что нередко наблюдается и кажется, на первый взгляд, возникает без видимых причин; какие-то внутренние, в нем самом лежащие причины вызывают возбужденное состояние. Это еще можно понять. Однако труднее представить себе самовозбуждение (самораздражение) клетки или органа. В действительности же нет никаких оснований отрицать наличие (в том числе и у человека) неких внутренних побудительных причин, вызывающих возбуждение клетки или органа, как определенной самостоятельной системы. Здесь господствует неумолимый биологический закон, диктующий и состояние, и поведение системы любого уровня организации живой материи. Это явление (самораздражение) как общебиологическую закономерность мы попытались показать экспериментально около 30 лет тому назад.

Работая над проблемой реакции клеток на внешние раздражения, возникла мысль: почему только внешние факторы могут быть раздражителями, которые, по данным школы Д. Н. Насонова, должны приводить к паранекрозу (состоянию, близкому к смерти). Логично допустить наличие и некоего внутреннего, находящегося в самой клетке раздражителя. Естественно предположить, что наиболее мощным и, конечно же, самым биологическим раздражителем должен быть голод. Потребность в пище, как сама жизнь, наиболее властные побудители к действию. Эта идея была проверена экспериментально на мышах с использованием методики прижизненного окрашивания. О степени повреждения клеток и ткани организма судили по интенсивности их окрашивания. Априори мы ожидали, что основной эффект голодания проявится в клетках слизистой оболочки — пищеварительного тракта. В действительности же наиболее резкая реакция на голод проявилась на клетках головного мозга. Голод животного оказался могучим раздражителем нервных элементов головного мозга. Это фундаментальный факт.

Здесь, однако, необходимо отметить следующее. Печальный опыт ленинградской блокады побудил врачей, физиологов различного профиля провести всестороннее исследование последствий голода — этого страшного для человека явления. Было и раньше известно, а в этот период вновь подтверждено, что при голодании мозг

дольше других органов сохраняет неизменность своего веса. Казалось, что «центр управления» наиболее охраняем от различных воздействий. Но тогда каким же образом можно объяснить, что головной мозг в наших опытах оказывается наиболее альтерирован (возбужден), чем другие ткани? Вероятно, это объясняется тем, что при голодании мощный поток импульсов, в первую очередь с интерорецепторов, поступает в различные отделы головного мозга. Они-то и вызывают столь резко выраженную паранекротическую реакцию.

Также несколько неожиданной оказалась реакция мышц на голодание животных. Вместо наступления паранекроза (повреждения) наблюдается лишь начальный этап реакции на раздражение, который характеризуется повышением резистентности к действию различных повреждающих факторов. Нетрудно увидеть биологическую значимость такой реакции. Это — мобилизация необходимых ресурсов для мышечной деятельности. Голод вызывает потребность в мышечной деятельности и побуждает к ней. «Волка ноги кормят!» — гласит как всегда мудрая народная поговорка. Неизвестно, насколько люди, сочинившие ее, были знакомы с биологией, но с чувством голода они были, наверное, хорошо знакомы и потому могли выразить фундаментальное явление в биологии так удивительно просто и правдиво.

Наши опыты показали, что голод, потребность в пище является самым мощным раздражителем, присущим живой и только живой материи. Самовозбуждение, спонтанная активность, наблюдаемая без видимых причин, не должны удивлять своей таинственностью. Скрытая причина тому — потребность в пище. Мы не знаем механизма действия голода на клетку так же, как мы ничего не знаем о механизме спонтанной активности мышц и нервных клеток. Но это — задача будущего. Сейчас важно лишь подчеркнуть, что самовозбуждение — явление, реально существующее в биологии. Прекрасным примером биологической потребности в активном движении, мышечной деятельности служат, например, детские игры. Нам неизвестно, с какого уровня эволюции животных отмечаются в их среде игры. Известно, что они широко распространены у рыб, рептилий, птиц, млекопитающих. Нас в данном случае интересует природа этих игр, биологическая потреб-

ность в них. Разумеется, игры имеют определенное популяционное значение. Они развивают физическую силу, ловкость, точность движений, остроту зрения, слуха и др. функции. Все это так. Но кто и что побуждает детей и людей, и животных к играм, к различным прыжкам, кувырканиям? Кстати сказать, игры у животных наблюдаются и в зрелом возрасте. Вообще, однако, игры свойственны раннему периоду постнатального развития, начальному этапу индивидуальной жизни особи, когда энергетические возможности мышц намного превышают фактическое их расходование. Потребность в движении при дефиците энергетических возможностей не появится. Таким образом, игры детей определяются не целями, а потребностью мышц к движению, к действию.

Итак, живые системы нуждаются в постоянном действии механической энергии.носителем этой энергии является мышца, уникальная биологическая структура, появившаяся у самых истоков эволюции животного царства, и в морфологическом многообразии она представлена у животных всех уровней эволюционного развития. Ее биологическая особенность заключается в том, что при определенных условиях она сама себя обеспечивает необходимой энергией; ее деятельность носит ритмический характер и, в связи с этим, обладает высокой чувствительностью к ритмическим раздражениям; мышца нуждается в постоянном раздражении; при определенных условиях у мышцы возникает потребность к деятельности, которая осуществляется либо под влиянием раздражения, либо благодаря самовозбуждению (спонтанная ритмическая активность).

Эти биологические особенности мышц следует иметь в виду при оценке роли механических колебаний (звука и вибрации) в жизни животных и человека.

### **СТИМУЛЯЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗВУКОМ И ВИБРАЦИЕЙ**

Прежде чем приступить к изложению фактов и наблюдений, свидетельствующих о стимуляции биологических функций звуком и вибрацией, следует отметить историческую закономерность, касающуюся выбора направления исследований. Общеизвестным кажется те-

зис о том, что направление исследований определяется потребностями общества и его социальным заказом. Не оспаривая этот тезис, надо сказать, что логика развития науки имеет и свои законы. Испокон веков биолог зорко следил за развитием естествознания и любые существенные открытия незамедлительно стремился использовать в своих биологических исследованиях. Хорошо по этому поводу сказано знаменитым лондонским химиком Оствальдом: «Не успеет химик создать более или менее стройное здание своих исследований, как на его крыше уже копошится биолог». Успехи коллоидной и физической химии немедленно использовались биологами для понимания законов формирования протоплазматических структур, поведения белковых растворов. Открытие эклектричества произвело подлинную революцию в биологии. Многие биологические явления получили строго научное объяснение. Электрофизиологические методы приобрели ведущее значение в физиологии. Открытие X-лучей Рентгеном, радиоактивных излучений немедленно привлекло внимание биологов. Начальный интерес к этим открытиям был связан не только с чисто исследовательскими задачами, но и с глубоко практическими целями. То же можно сказать и о вибрации. С развитием техники, и в частности электротехники, появилась возможность генерации механических колебаний в целях терапии. Этот «мирный» путь развития наук, научных исследований по их внутренним законам резко изменился в эпоху НТР. Возник срочный социальный заказ: установить степень опасности для биологической судьбы человека последствий НТР.

После взрывов атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки и после серии взрывов в последующие годы в целях испытаний и дальнейшего совершенствования этого дьявольского оружия над человечеством нависла смертельная опасность радиоактивного поражения. Появилась срочная необходимость выяснить степень этой опасности не только для здоровья человека, но и вообще для его биологической судьбы. Именно эта задача и ставилась во всех радиобиологических исследованиях. Вопрос об использовании радиации в качестве стимулятора биологических процессов, насколько нам известно, не был предметом исследований.

Такая же историческая последовательность повторилась и с проблемой биологического действия вибрации. В 40-е, 60-е годы вибрационная болезнь приобрела размах бедствия. По мнению академика А. А. Благонравова (1974) предприятия атомной промышленности приносят меньше вреда, чем вибрация. Эта «проблема, рожденная современной научно-технической революцией, представляет собой часть общей, очень сложной социальной проблемы взаимодействия человека с окружающей его внешней средой». В этих условиях, само собой разумеется, исследования были направлены на выяснение биологической опасности действия вибрации. Никакого специального исследования стимулирующего действия вибрации, конечно же, не проводилось. К сожалению, этой проблемы нет и сейчас, хотя, как нам кажется, она непременно должна быть.

Теперь этот «взрыв» научных исследований прошел. Степень опасности для человека действия шума и вибрации в условиях НТР не только в основном, но и во многих деталях установлена. Необходимо новое направление исследований, ориентированное на поиск возможных путей использования этого вида энергии в интересах человека. Стимуляция биологических функций звуком и вибрацией является одной из наиболее важных проблем в этой области исследования.

Факты и наблюдения, касающиеся стимулирующего действия звука и вибрации, получены по большей части случайно в процессе исследования вредного действия этих факторов. Внимательный наблюдатель не мог не замечать эффекта стимуляции, так как он является обязательной реакцией клетки на раздражение любым физическим фактором внешней среды. И то, что экспериментатор наблюдал по ходу своих исследований некий побочный эффект, в действительности есть проявление фундаментальных свойств живой материи. Речь идет о таком явлении, как повышение функциональной активности и резистентности в ответ на раздражение. Это — специфически биологическая реакция и наблюдается на всех уровнях организации: клетки, ткани, организма. Данные о биологически полезном влиянии звука и вибрации необходимо обобщить и сделать их союзниками в практической деятельности человека.

А. Е. Щербак одним из первых в России еще в начале века показал роль вибрации как стимулятора

биологических процессов. Давно уже было известно, что фарадизация вызывает резкое утомление мышц, значительно падает амплитуда их сокращения. Если, однако, предварительно мышцу кролика подвергнуть вибрации с частотой 100 Гц в течение 10 мин, и делать это в течение нескольких дней, то фарадизация в этих случаях не только не вызывает утомления, но, судя по амплитуде сокращения мышцы, стимулирует ее деятельность. Так, после предварительной вибрации амплитуда сокращения мышцы в первую минуту фарадизации оказалась на 70 % выше. Если приложить вибродатчик к коленному суставу, то после 15—20 мин вибрации заметно повышается коленный рефлекс. Более того, как указывал Щербак, рефлекс повышается даже у лиц, страдающих полиомиелитом. Заслуживает внимания вывод автора, что механические вибрации, для восприятия которых служат особые периферические нервные аппараты в надкостнице и костях, являются биологическим фактором, имеющим важное значение для жизни и деятельности нервной системы. Эти опыты подчеркивают важную роль для нервной системы механических раздражений, влияние которых почти игнорировалось до сих пор в нервной физиологии. Говоря о действии вибрации на мышцы, Щербак отмечает ее роль в удалении метаболитов, а также ее влияние на процессы в самом сократительном веществе. К сожалению, Щербак был одним из немногих авторов, который исследовал стимулирующее действие вибрации. Огромный же поток работ за последние 50—60 лет касается исследований лишь патологического действия вибрации и звука. Стимулирующий эффект действия механических колебаний наблюдался на биологических объектах, побывавших в космосе.

Я. Л. Глембоцкий с соавторами (1961) указывает, что жизнеспособность актиномицетов штамма 2577, побывавших на втором корабле-спутнике, значительно (в 6 раз!) повышается, судя по выживанию спор. Но это наблюдается лишь у радиоустойчивого штамма. Напротив у радиочувствительного штамма (8594) эта жизнеспособность оказалась резко пониженной. Авторы отмечали повышение темпа деления клеток у кукурузы и гороха. Напротив, у пшеницы темп деления несколько замедлен. Имеются данные о том, что вибрация и в земных, и в космических условиях стимулирует

биологические процессы: всхожесть, скорость роста. Вибрация мышей с частотами 700 и 1500 Гц в течение часа достоверно повышает прибавку в весе. Показано, что всхожесть семян ячменя в контроле равна 42.85 %, а после полета — 68.57 %. Корешки контрольных семян достигают размера 2 см через 54 ч, а побывавших в космосе — через 45 ч. Наблюдается защитный эффект вибрации. Так, число хромосомных перестроек клеток костного мозга мыши после облучения дозой 350 р составляет 19—24 %, а при облучении в сочетании с вибрацией (700 Гц) всего лишь 8.7 %.

Динамический фактор космического полета при определенных условиях повышает общую резистентность животных. Так, опыты, поставленные в земных условиях, показали, что, например, вибрация с ускорением в направлении грудь—спина равна 8 g, увеличивает время плавания крыс со 114 до 160 мин. Авторы наблюдали в высшей степени интересное явление: через 4 ч после действия перегрузки выносливость упала, судя по продолжительности плавания, со 170 мин до 21!

Эффект действия перегрузки сохраняется несколько суток. Так, на 7-е сутки резистентность, напротив, увеличивается почти в 3 раза (310 мин) по сравнению с контролем. Вообще известно, что физиологические реакции на то или иное раздражение протекают волнообразно. Однако в данном случае пример кажется особенно выразительным, но, к сожалению, пока еще не имеющим объяснения.

Приведенные выше исследования биологических объектов побывавших в космосе, представляют интерес своей новизной условий, в которых находились эти объекты. Однако получаемые результаты являются эффектом суммарного действия всех факторов космического полета, и, конечно же, без специальных контрольных опытов, проведенных в земных условиях, нет оснований получаемые результаты относить за счет какого-либо отдельно взятого фактора: вибрации, перегрузки, невесомости, радиации и т. д.

Вообще же эффект стимуляции звуком и вибрацией встречается при исследовании животных различных уровней эволюции, на микроорганизмах и на растительных объектах.

## Ниже перечислены стимулирующие эффекты действия вибрации и звука

1. Кратковременная низкочастотная вибрация повышает у человека интенсивность дыхания, увеличивает потребление  $O_2$ .

2. Вибрация мышей с частотой 70 Гц, ускорением 5 g в течение часа и проведенная за 4 ч до облучения животных смертельной дозой (лучами Рентгена) снижает смертность; продолжительность жизни облученных животных увеличивается на 40 % по сравнению с животными, не подвергавшимися вибрации.

3. Вибрация мышей с частотой 70 Гц, ускорением 5 g в течение 30 мин повышает синтез белка в клетках костного мозга в 1.5—2 раза; увеличивается включение ЗН-лейцина.

4. Вибрация крыс с частотой 50 Гц, амплитудой 0.8 мм в течение 30 мин — повышает холинэстеразную активность слизистой желудка животных.

5. Локальная вибрация кролика (лапки) с частотой 40 Гц, амплитудой 1.25 мм в течение 30 мин повышает активность фосфатазы в эпифизах костей на 37 %; повышает включение  $^{32}P$ .

6. Локальная вибрация (шейная область кролика) частотой 100 Гц при амплитуде 0.5 мм в течение 15—20 мин в 2 раза увеличивает потребление кислорода мышцами бедра.

7. Локальная вибрация теплокровных животных: а) ускоряет заживление ран; б) ускоряет регенерацию тканей; в) повышает интенсивность метаболизма.

8. Вибрация изолированных мышц крыс частотой 100 Гц при ускорении 5 g в течение 30 мин повышает их резистентность к высокой температуре.

9. Вибрация крыс (самцов) с частотами: 25, 100 Гц, при ускорении 5 g, в течение 30 мин повышает ферментативную активность белка мышц в 1.5—2 раза; так же значительно повышается резистентность белка к постоянному току.

10. Вибрация изолированных мышц крыс частотой 100 Гц при ускорении 5 g в течение 10 мин резко повышает ферментативную активность и резистентность актомиозина.

11. При вибрации раствора белка частотой 200 Гц при ускорении 2—3 g в течение 30 мин наблюдается стимуляция ферментативной активности.

12. Вибрация бактерий звуковой частотой ускоряет рост (размножение) культуры.

13. Вибрация дрожжевых клеток ускоряет прирост биомассы.

14. Вибрация культуры коловраток частотой 700 Гц при ускорении 10 g повышает плодовитость особей в 2 раза.

15. Действие слышимого звука, имитирующего звук японского перепела, на яйца после 15 сут их инкубации ускоряет вылупление птенцов.

16. Слышимый звук 60—70 дБ повышает АТФазную активность раствора актомиозина.

17. Действие звука интенсивностью 85 дБ по 2 ч в сутки резко повышает окислительное фосфорелирование митохондрии мышц теплокровных.

18. Звук с частотой 500—8000 Гц интенсивностью 115 дБ в течение 30 мин вызывает у крыс: а) повышение интенсивности дыхания; б) увеличение потребления  $O_2$  различными отделами головного мозга; в) повышения интенсивности общего метаболизма.

19. Действие на культуру дрожжей ультразвуком с частотой 200 кГц интенсивностью  $0.3 \text{ Вт/см}^2$  в течение часа значительно ускоряет репродукцию (рост) биомассы.

20. Ультразвук 800 кГц мощностью  $0.8 \text{ Вт/см}^2$  в течение 5 мин повышает интенсивность дыхания и интенсивность гликолиза головного мозга крыс, морских свинок, кроликов.

21. Ультразвук 800 кГц интенсивностью  $0.3 \text{ Вт/см}^2$  повышает интенсивность потребления  $O_2$  митохондриями головного мозга.

22. Ультразвук 346 кГц, действует 1—3 мин на клубни картофеля, повышает урожайность в 1.5—2 раза; значительно увеличивается рост зеленой массы.

Теоретически нет оснований приписывать стимулирующее действие вибрации только с частотой 100 Гц и 5 g. Это лишь частный случай общей закономерности фазной реакции живого вещества на внешнее воздействие, установленной еще в школе Н. Е. Введенского—А. А. Ухтомского на возбудимых системах. Исходя из общей закономерности реакций на раздражение, можно

ожидать стимулирующий эффект вибрации и при других ее параметрах (частотах и ускорениях).

Результаты многочисленных исследований стимулирующего действия вибрации на белковых комплексах оказались весьма информативными. Они указывают на связь таких фундаментальных процессов, как белковый синтез и механическими раздражениями. При этом возникает ряд общебиологических вопросов, которые на современном уровне наших знаний пока еще не имеют удовлетворительных объяснений. Например, вибрация животного с частотой 100 Гц повышает резистентность белка к постоянному току только у самцов. На белке, полученном из мышц самок, этот эффект отсутствует. Вибрация с частотой 25 Гц у самцов повышает резистентность белка, у самок — достоверно подавляет. Вибрация с частотой 200 Гц подавляет в обоих случаях резистентность белка (рис. 12).

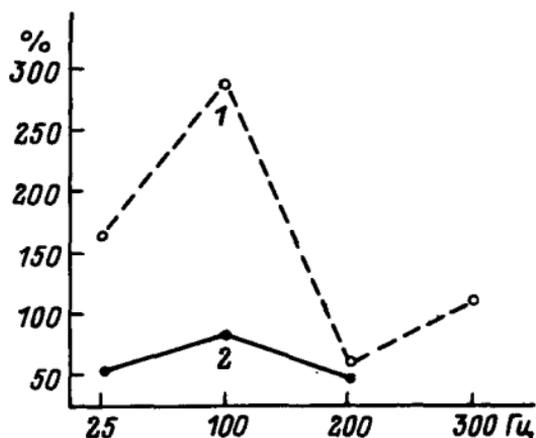


Рис. 12. Изменение резистентности белка под влиянием вибрации в зависимости от пола животного.

По оси абсцисс — частота вибрации; по оси ординат — ферментативная активность.  
1 — самцы, 2 — самки.

Мы пока мало знаем о различиях белка, связанных с полом животного. Для начала, однако, важно иметь в виду сам факт различия в чувствительности к вибрации белка самцов и самок, поскольку уже давно известны факты различия чувствительности клеток и тканей самцов и самок различных животных к действию повреждающих факторов. Однако данные о различной чувствительности к вибрации белка из мышц самцов и самок публикуются впервые.

На протяжении всей книги мы старались показать, что звук и вибрация являлись и являются постоянными спутниками жизни животных и человека, причем не индифферентными для них, а сугубо необходимыми. Они, эти спутники, являются основной компонентой среды, в условиях действия которой шла эволюция жизни на Земле. Но на современном этапе эволюции звук и вибрация стали угрожать не только здоровью и благополучию человека, но и, быть может, его биологической судьбе. Явление несомненно парадоксальное и, к сожалению, довольно драматическое. Виной тому научно-техническая революция, ее издержки, ее тень, которую она отбрасывает на все бытие человека.

Но патологическое действие звука и вибрации отнюдь не является неизбежным, оно не заложено в природе действующих факторов. Напротив, они — союзники в жизни особей. Более того, в отличие, например, от биологического действия ядерных излучений здесь нет явлений суммации, накопления эффекта от малых доз. Однократное действие шума или вибрации с прекращением этого действия практически не оставляет следа. Оба эти обстоятельства несомненно облегчают борьбу с их вредными для человека действиями.

Проблемы борьбы с вибрациями и шумами находятся целиком в руках человека, и здесь нет ничего эволюционно неизбежного. В проблеме взаимодействия механической энергии (колебательной) с биологическими системами есть другой, биологически более важный и исторически (социально) обусловленный аспект. Речь идет о дефиците механических раздражений и генерации механической энергии. В функциональном ансамбле биологических структур организма мышца, как уже отмечалось всем ходом эволюции, создана для того, чтобы совершать механические движения, выполнять механическую работу. Причем, как надо думать, для нормальной жизнедеятельности организма и количество механической энергии, которую особь должна генерировать на протяжении индивидуальной жизни, должно быть задано. Эта закономерность выработалась в процессе эволюции. И вот для человека этот закон в условиях научно-технической революции нарушается, возникает новая биосоциальная проблема, которая теперь именуется гиподинамией и которую считают болезнью цивилизации. Скажем об этой проблеме несколько подробнее.

## **БИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ПРОБЛЕМА ГИПОДИНАМИИ**

С древнейших времен человек, может быть и не вполне осознанно, замечал некую связь и даже зависимость своего здоровья с физической деятельностью. Механические движения, работа — наглядно врачевали, устраняли недомогания, улучшали самочувствие. Труд не только формировал человека, но и научил его понимать связь трудовой деятельности с состоянием его самочувствия, с его силой и выносливостью. Конечно же, из трудовой деятельности возник и спорт — источник физической силы, телесной красоты, мужества и здоровья.

Как мы уже отмечали, ведущим началом эволюции была мышца, удивительное творение природы. Всевозможные формы движения от внутриклеточных механических колебаний до творческих движений руки музыканта, художника или скульптора, до строго направленных движений спортсмена, гимнастики, вихря танцев, балета — весь этот мир движений обеспечивается мышцей. С самого зарождения жизни первые сократительные элементы — предтечи будущих мышц — одновременно были и рецепторами внешних раздражений, и эффекторами, определяющими поведение (реакции) клетки и организма. Перефразируя слова К. Тимирязева «Лист — это растение!», А. Ф. Самойлов, развивая идеи Сеченова, сказал: «Мышца — это животное!»

По мере развития животного царства в мышечных структурах появились более чувствительные образования — элементы нервной системы. Произошло разделение функций: функцию рецепторов взяли на себя нервные элементы, эффекторов — мышцы. В дальнейшей эволюции нервная система взяла на себя всю полноту власти в управлении жизнедеятельностью организма, оставив за мышцами их рабочую механическую функцию. Эволюция пошла по пути цефализации.

Самое кардинальное явление в биологии человека стало обнаруживаться за последние два-три столетия: мышцы, как источник механической энергии, все более и более утрачивают свое значение в жизни организма. По мере развития техники доля мышечного труда убывала, заменяясь трудом машин — продуктов человеческого разума. Как указывал академик А. И. Берг, в 1850 г. 94 % из всей энергии, находящейся в распоря-

жении человека, приходилось на долю мускульных усилий, а через сто лет, в 1950 г., — только 1%! Трудно сказать, какая доля участия энергии мышц теперь, когда за последние 30 лет прибавился огромный поток энергии из новых ее источников — атомных электростанций.<sup>1</sup>

В этой поляризации функций возникает один из фундаментальных вопросов биологии — вопрос о биологической роли механической энергии, о гармонии, миллионы лет формирующейся между механическими движениями и биологическими процессами. Речь идет не только и не столько о необходимости механических колебаний в элементарных биологических процессах, сколько о гармонии более высокого уровня между механическими силами организма и его интеллектом.

Пытливый ум наших далеких предков — египтян, арабов, греков уже замечал некую связь умственной активности с физической деятельностью организма. В новейшую эпоху — в XVII—XVIII вв. — этот вопрос формулируется более определенно. По мнению, например, Вольтера, неподвижный образ жизни снижает умственную работоспособность. Дефицит движений влечет за собой изъян интеллекта. Как известно, уже в XVIII в. стали предприниматься попытки компенсировать этот дефицит движений искусственной стимуляцией мышц. С этой целью, в частности, было сконструировано вибрирующее кресло. Вибрация в известной мере утоляет сенсорный голод мышц, что, по мнению специалистов, должно устранять дисгармонию между мышечной и умственной деятельностью. Вольтер с похвалой отзывался о значении такого кресла.

Около ста лет спустя И. М. Сеченов сделал блестящее открытие: установил наличие так называемого *мышечного* чувства. Мышцы информируют центры мозга о своем состоянии. Функциональное состояние мышц контролируется нервными центрами. Со времен И. М. Сеченова и И. П. Павлова представление о связи мышечной и высшей нервной деятельности перешло из области гениальных догадок в область экспериментальных исследований. Теперь уже не подлежит сомнению наличие в биологической эволюции человека двух взаи-

---

<sup>1</sup> По данным Всемирной конференции радиобиологов (1970) количество энергии от атомных электростанций в предстоящие три десятилетия увеличится в 200 раз!

мопротивоположных путей развития: высшая нервная деятельность человека стремительно развивается, приобретая все большее могущество и в индивидуальной, и в общественной жизни; мышечная деятельность, напротив, утрачивает свое первородное значение. Каковы последствия такой эволюции — предсказать невозможно. Остановится ли на каком-либо уровне рекапитуляция мышц? Или этот процесс необратим? Возникает довольно драматическая ситуация — нарушаются эволюционно сложившиеся нервно-мышечные отношения. С точки зрения биологической эволюции, это явление противоестественное.

Творцом нервной системы была мышца, так как в процессе эволюции потребовалась специальная высокочувствительная структура — нервная система и нервные элементы. За много миллионов лет эволюции нервная система приобрела ведущую роль во взаимоотношениях живой системы с окружающим миром, но без мышцы ее роль биологически бессмысленна! Так, знаменитый фантаст Г. Уэллс писал, что среди селенитов («Первые люди на Луне») есть создания, состоящие лишь из головы-шара, заполненного мыслящей субстанцией. Великий Лунарий состоял лишь из головы диаметром в несколько ярдов, собственных мышц не было. Передвижение его в пространстве осуществлялось специальными селенитами. Но это — область фантастики. Реально же жизнедеятельность нервной системы без мышцы немыслима. Мысль есть функция нервной системы, но проявляется она через деятельность мышцы. Суть этой связи в прекрасной форме выразил И. М. Сеченов: «Смеется ли ребенок при виде игрушки, улыбается ли Гарибальди, когда его гонят за излишнюю любовь к родине, дрожит ли девушка при первой мысли о любви, создает ли Ньютон мировые законы и пишет их на бумаге, — везде окончательным актом является мышечное движение» (1952, т. I, с. 9).

На данном этапе эволюции озабоченность вызывают реальные факты патологических явлений в организме в результате дефицита мышечной деятельности. Как показывают наблюдения и экспериментальные данные, патологические явления обнаруживаются во всех функциональных системах организма: в том числе в высшей нервной деятельности возникла глобальная биосоциальная проблема, именуемая гиподинамией. Одним

из стимулов для разработки этой проблемы явились космические исследования. В силу невесомости и ограниченности пространства космонавты в течение полета практически не совершают мышечной работы, мышцы лишены присущей им деятельности. В связи с развитием техники, замены ручного труда машинным — проблема гиподинамии приобретает глобальные размеры и в земных условиях (Кошелев, 1976; Лобзин и др., 1979; Федоров, 1982).

По поводу экспериментальных исследований проблемы гиподинамии на животных необходимо сказать следующее. То, что экспериментатор вызывает и называет гиподинамией у животных, по своей биологической природе не соответствует гиподинамии, возникающей у человека. Гиподинамия у человека в земных условиях — это неизбежное следствие его биосоциальной эволюции. Гиподинамия, экспериментально вызванная у животных, не имеет никакой связи с процессом эволюции животного мира; это — явление, искусственно вызванное у животных. Само насилие над животными не менее мощный фактор, чем обездвиживание, определяет реакцию всех функциональных систем организма. Общеизвестно также учение И. П. Павлова о стереотипах. Нарушение привычного для данной особи стереотипа может иметь роковые для жизни животного последствия.

Насильственное нарушение свободы воли животного — это стресс, реакция на который не может быть отнесена на счет гиподинамии. Что касается человека, то и здесь в понятие гипокинезии (гиподинамии) вкладываются биологические явления, едва ли имеющие между собой что-либо общее, отражающее эволюционно обусловленную гиподинамию. В самом деле: между явлениями гиподинамии стареющего организма человека; недугом прикованного к койке работника, в силу производственных условий лишенного возможности движений; космонавта в полете — имеется лишь то общее, что люди лишены возможности проявлять мышечную активность. Но ясно, что природа этой гиподинамии во всех случаях различна, а вместе с тем и последствия ее во всех случаях будут различными. Вообще, проблема гиподинамии — явление особого рода. По своему характеру она биосоциальна и касается главным образом биологической судьбы человека. В живот-

ном мире это явление исключено. В литературном обиходе эта проблема именуется модным названием *болезнь цивилизации*, но цивилизация, приведшая к революции в науке и технике, не порождает эту проблему, а лишь делает ее более острой и опасной для человека. В вихре человеческой деятельности этот биосоциальный процесс веками оставался незамеченным. Теперь как-то внезапно человек вдруг ощутил значительность проблемы гиподинамией.

Слово *болезнь* в этой проблеме по существу также неуместно. Болезнь — понятие медицинское, а гиподинамия — понятие по своей природе не медицинское, а биосоциальное и не нуждается во врачевании, как и не нуждаются в лечении, например, голод, жажда. Гиподинамия — тот же голод, но голод сенсорный, голод в мышечной деятельности. Его лечение заключается в удовлетворении биологической потребности в движении, в механической деятельности.

Гиподинамия — дефицит движения, явление, опасное своими биологическими последствиями. Нарушаются эволюционно сложившиеся взаимоотношения центральной нервной системы, как координирующего центра, с ее исполнительными органами, и прежде всего с мышцами. Следовательно, биологический аспект гиподинамии связан с одной из координальных проблем эволюционной физиологии — проблемой взаимоотношения высшей нервной деятельности с ее рабочими органами. Эта проблема имеет уже более чем столетнюю давность. К чести русской физиологии следует отметить, что начало разработки проблемы было положено еще в 60-е гг. прошлого столетия известными физиологами И. Навалихиным и Н. Кавалевским в Казани, И. Ционом — в Петербурге, Н. Роговичем — в Киеве (цит. по: Х. С. Коштоянц, 1950).

В конце 50-х—начале 60-х гг. XIX в. И. М. Сеченов впервые высказал идею о трофической роли нервной системы. По его мнению, нервная система нужна не только для осуществления нервно-рефлекторных актов, но она нужна и для поддержания «анатомической, химической и физиологической целостности иннервируемого органа». Нельзя не восхищаться этой изумительной прозорливостью ученого. Последующая столетняя история физиологических исследований подтвердила эту идею многочисленными экспериментальными дан-

ными, сохраняя благоговейную память к ее автору. В более широком эволюционном аспекте эта проблема получила дальнейшее развитие в СССР за последние 50—60 лет. Эта честь принадлежит Л. А. Орбели и его школе. Суть идей Орбели заключается в том, что между нервными центрами и рабочим аппаратом сложились интимные, взаимозависимые отношения. Так, если деафферентировать, например, заднюю конечность собаки, то наблюдаются довольно резкие изменения в соответствующих сегментах спинного мозга. Эти сегменты, как отмечал Орбели, реагируют на все импульсы, возникающие где бы то ни было в центральной нервной системе. Следовательно, в норме импульсы, идущие от рабочих органов (с мышц конечностей), регулировали, создавали некую упорядоченность в реакциях (деятельности) нервных центров.

Это очень важное наблюдение — афферентные импульсы, идущие с мышц в центральную нервную систему (ЦНС), оказывают влияние на ее деятельность, следовательно на поведение особи. Мы не знаем механизма действия афферентных импульсов на нервные центры, но результаты этого действия доказаны экспериментально. Каково же действие ЦНС на мышцы? По данным школы Орбели, в случае перерезки моторных (двигательных) нервов наблюдается так называемая регрессивная эволюция или рекапитуляция мышц. Выйдя из подчинения регулирующего влияния ЦНС, мышцы начинают проявлять те свойства, которые были присущи им в ранний период эволюции. В частности, появляются собственные ритмические сокращения мышцы, повышается ее чувствительность к ацетилхолину и другим химическим агентам. Л. А. Орбели отмечает, что при регенерации нервов в мышце вновь восстанавливаются утраченные при перерезке свойства, причем — и это особенно надо подчеркнуть — восстанавливаются в той же последовательности, в какой они проявлялись в процессе эволюции.

Позднее известный английский физиолог В. Кеннон дал прекрасную сводку исследований, касающихся всесторонней характеристики денервированных мышц, выполненных физиологами за целое столетие, начиная с 50-х гг. прошлого до 50-х гг. нашего века. Автор формулирует основной закон денервации, который гласит: «Если в функциональной цепи нейронов одно из звеньев

прервано, общая или частная денервация последующих звеньев цепи вызывает повышение чувствительности всех дистальных элементов (включая и денервированные структуры и эффекторы) к возбуждающему или тормозящему действию химических веществ и нервных импульсов; повышение чувствительности сильнее в звеньях, которые непосредственно примыкают к перерезанным нейронам» (с. 20). К проблеме гиподинамии эти данные имеют прямое отношение. Они показывают, что не только денервированные мышцы, но и ряд мышц, лишенных активного движения иными причинами, лишивших ее этой активности, обречены на атрофию. Это, вероятно, явление неизбежное, природой заданное. Мышца создана для движения, вне движения ее существование биологически не оправдано. Эта идея высказывалась еще Ламарком.

Для человека в условиях НТР создается довольно драматическая ситуация. Трудовая деятельность человека все меньше и меньше нуждается в услугах мышц. Физический труд во все возрастающих темпах заменяется трудом интеллектуальным. Какова дальнейшая эволюционная судьба мышц — пока предсказать трудно. Утрата мышцами исторически сложившегося объема выполняемой ими работы, утрата активной деятельности неизбежно приводят к их атрофии.

В животном мире такой драматической ситуации нет. Это сугубо биологическое явление — атрофия мышц, лишенных природой заданной им функций движения, является результатом социальной эволюции человека. Борьба с утратой (атрофией) мышечной структуры является центральной проблемой гиподинамии. На каких биологических закономерностях может основываться эта борьба? Кеннон приводит очень важные данные исследований характера мышечной атрофии в случае денервации и в случае утраты активности при сохранении связи с нервами. Оказывается, в ряде случаев искусственная стимуляция мышц предотвращает атрофию, но только у тех мышц, у которых связь с нервными центрами сохранилась. Денервированную мышцу искусственная стимуляция от атрофии не спасает. Это очень важное биологическое явление, которое и может быть использовано человеком в борьбе с явлениями мышечной атрофии.

До сих пор речь шла о судьбе мышц при лишении их двигательной активности. Основной вывод, который следует из многочисленных исследований, заключается в том, что отсутствие двигательной активности обрекает мышцу на дегенерацию. Но мышца в организме живет не автономно. Она находится и в структурной, и в функциональной связи с нервной системой. Мы уже видели, что происходит с мышцами, если лишить их «опеки» центральной нервной системы. Но мы не знаем, что происходит в самой ЦНС при лишении ее связи с мышцами. Еще Сеченов указывал на наличие некоего мышечного чувства. Теперь благодаря работам В. Н. Черниговского широко известно, что проприоцепторы мышц посылают непрерывно потоки импульсов в ЦНС.

Не случайно в процессе эволюции уже у амфибий в мышцах появились мышечные веретена — мощная сеть афферентной иннервации. Каков биологический смысл этих импульсов? Очевидно, идет информация о состоянии периферии, ее рабочих органов. По этому поводу хорошо сказал известный русский физиолог А. Ф. Самойлов (в статье «И. М. Сеченов и его мысли о роли мышц в нашем познании мира»): «Мы имеем право смотреть на всю центральную нервную систему и на органы чувств как на придаток к мышцам, по крайней мере в том смысле, что мышца вызвала к жизни этот придаток: нет животного, которое обладало бы ЦНС и не обнаруживало бы в своей системе мышечных элементов». Следовательно, не только мышцы находятся под постоянным воздействием ЦНС, но и ЦНС в свою очередь находится под воздействием мышц. Эта взаимозависимость сбалансирована всей многовековой эволюцией, и пока трудно предвидеть последствия нарушения этой взаимной зависимости. Еще нет сколько-нибудь удовлетворительных методов для решения проблемы: каковы последствия гиподинамии в интеллектуальной деятельности человека. Разумеется, нельзя относить за счет гиподинамии нарушения рефлекторной деятельности животных, замурованных в гипс в целях обездвижения, как это трактуется в ряде исследований. В 1924 г. И. П. Павлов в период наводнения в Ленинграде был вынужден перевести подопытных собак в верхние этажи. Этого перемещения было достаточно, чтобы вызвать необычайно сложные нарушения услов-

норефлекторной деятельности. Вряд ли насильственная иммобилизация животного вызовет меньший эффект в ЦНС, чем перемещение собак на другие этажи. Пока что мы вынуждены судить о влиянии гиподинамии на интеллектуальную деятельность лишь по косвенным данным, частным, иногда субъективным наблюдениям, без достаточно надежной экспериментальной основы. В заключение мы можем лишь сказать, что веками сбалансированная гармония умственной и мышечной деятельности нарушается. Что станет с умственными способностями человека в условиях гиподинамии? Эта проблема во весь рост встала перед человечеством.

### **ВИБРАЦИЯ КАК ЛЕЧЕБНЫЙ ФАКТОР**

Из всех видов физических методов лечения различных недугов человека наиболее биологическим является вибротерапия. Это вытекает из самой природы биологического действия механических колебаний. Разумеется, не случайно метод лечения вибрацией развивался вместе с другими методами терапии, связанными с воздействиями на организм механических факторов, такие как массаж и лечебная физкультура. Как и другие, вибрационный метод вначале носил эмпирический характер, хотя еще А. Е. Щербак говорил о том, что вибрация проторяет рефлекторный путь, удаляет продукты метаболизма, нормализует функции. Однако это были лишь общие догадки о возможных действиях вибрации.

Вибротерапия, как метод физиотерапии, вошла в медицинскую практику в конце XIX—начале XX в. Но внедрение ее шло крайне медленно и эпизодически.

В краткой исторической справке И. Р. Тарханов (1893) указывал, что первое вибрационное устройство (вибрирующая каска) для снятия головных болей была сконструирована во Франции в 1737 г. Это устройство широкого распространения не получило и вскоре было забыто. Лишь спустя почти 150 лет она была снова «изобретена» в школе знаменитого французского врача Шарко (в 1878 г.). Полагают, что медленное внедрение вибротерапии в практику объясняется тем, что не было теоретических обоснований к ее применению. Это, конечно, справедливо, но есть и более общие исторические причины социального характера.

Как известно, перед Великой Отечественной войной и особенно после войны необычайно бурно стали развиваться различные отрасли промышленности. Началась научно-техническая революция, издержки которой стали угрожать здоровью человека. В 1940-х годах появилась одна из первых в СССР монографий о патологическом действии вибрации. Вместе с техническим прогрессом появилась новая нозологическая единица болезни, теперь уже хорошо известная *вибрационная болезнь*. В 50—60-х гг. число заболеваний вибрационной болезнью стало опережать все другие профзаболевания. Ясно, что в этих условиях на первый план выступала проблема исследования патологического действия вибрации. В стране появились десятки исследовательских коллективов, лабораторий, кафедр по изучению данной проблемы. Наблюдалось явление, аналогичное тому, что было в радиобиологии. В обоих случаях в первую очередь требовалось выяснить степень биологической опасности для человека действия в первом случае радиации, во втором — вибрации. В радиобиологии после длительного периода исследований характера лучевых поражений, воспроизведения модели лучевой болезни перешли к исследованиям механизмов биологического действия радиации. После того как была найдена мишень действия радиации, исследования были направлены на проблему репарации лучевых поражений.

В проблеме *вибрации* оказались иные пути ее решения. К сожалению, период моделирования вибрационной болезни на животных, так же как и клинические наблюдения ее течения на людях, несколько затянулся. До сих пор еще продолжают наблюдения и исследования, которые практически не несут какой-либо полезной информации. Естественно, что самым актуальным и первоочередным сейчас является вопрос о механизме действия вибрации на биологические объекты.

Прежде всего необходимо выяснить взаимодействие биологических структур (которые и являются мишенью действия вибрации) с механической волной. Зная, какой биологический эффект вызывают механические волны в том или ином объекте (клетке, ткани, органе или в целом организме), можно заранее прогнозировать последствия действия вибрации заданной характеристики. Так, например, нами было экспериментально

установлено, что вибрация мышц с частотой 25 Гц и ускорением 5 подавляет ферментативную (АТФазную) активность актомиозина. Мышца теряет способность совершать работу. На основании этих данных, можно было заранее предвидеть, что вибрация животных с этой частотой будет резко подавлять их физическую выносливость. Опыты подтвердили это предположение. Говоря о механизме биологического действия вибрации, следует иметь в виду, что в самом действии вибрации заложена возможность нормализации физиологических процессов. Можно, конечно, говорить в таком случае о вибрации, как о лечебном факторе. С биологической точки зрения, вибрация (механические колебания) является необходимым, постоянно действующим фактором в живых системах различных уровней организации, и в этом смысле вибрация не «лечит», а нормализует присущий данному объекту биологический процесс.

Следует отметить, что в настоящее время, прежде всего у нас в СССР, намечается новое направление исследований общей проблемы биологического действия вибрации и звука. Это направление касается уже не моделирования вибрационной болезни, а исследования возможных, биологически полезных эффектов вибрации не только в медицинской, но и, например, в сельскохозяйственной практике. В ряде работ, посвященных вибротерапии, приводятся данные о лечебном действии вибрации. В сущности, лечение сводится к тому, что вибрация нормализует свойственную данному органу (ткани) функцию, т. е. вибрация выполняет ту роль, которую она и выполняла в течение всей жизни на Земле. Данные подчеркивают именно биологическую сторону проблемы. Следует обратить внимание на очень важный факт, связанный с физической характеристикой вибрации. Во всех приводимых исследованиях лечебного действия вибрации использовались и частоты, и амплитуды колебаний, сравнимые с теми, которые вызывают патологические процессы, вибрационную болезнь: частоты порядка 10—100 Гц; интенсивности, судя по амплитуде, порядка 2—3 g.

Это очень важное и трудно объяснимое явление: вибрация с одними и теми же физическими параметрами в одном случае вызывает вибрационную болезнь, в другом — хорошо выраженный терапевтический эф-

фект. В чем тут дело? Биологам хорошо известна двух-фазная реакция на раздражение: слабое действие лю-бых, именно любых физико-химических, факторов сти-мулирует интенсивность биологических процессов, бо-лее сильное — их подавляет. Это хорошо показано канадским ученым Гансом Селье при изучении стресса не только на клетках и тканях, но и на целом организ-ме. Во всех этих случаях речь идет о слабых и сильных воздействиях. Здесь, однако, и по интенсивности воз-действий различий нет. По нашему мнению, более или менее удовлетворительным объяснением этого парадок-сального явления может быть следующее. Само по себе действие вибрации не является патологическим. Мы уже не раз подчеркивали, что механические колебания являются необходимой компонентной внешней среды в обеспечении нормальной жизнедеятельности. Мы так-же считаем, что мишенью действия вибрации является структура объекта. Из этого следует, что, например, при вибрации животного в широком диапазоне частот всегда есть возможность обнаружить ту структуру, которая будет резонировать одну из применяемых частот. Возникший резонанс уже в силу чисто физиче-ских явлений может привести систему к патологии. В самом деле, вибрация мышцы с частотой 25 Гц вы-зывает резонансные явления в легких. Результаты: кро-воизлияние, летальный исход. Вибрация с частотой 20 Гц вызывает у экипажа вертолета резонанс в зри-тельной системе, в результате чего теряется способ-ность читать показания приборов.

Резонансные явления в биологических структурах, возникающие при вибрации, теперь широко известны. Физическое явление резонанса возникает при совпаде-нии частот, навязываемых системе извне, с собственной частотой колебаний системы и практически в началь-ный момент не зависит от интенсивности этих колеба-ний. Интенсивность, судя по амплитуде, многократно увеличивается лишь позже, при возникновении резо-нанса, который приводит и к авариям на кораблях, различных видах летательных аппаратов, а в биоло-гии — к патологии или даже к гибели объекта. Именно исходя из резонансной гипотезы действия вибрации на живые объекты, становится понятным, что одна и та же частота вибрации, независимо от ее интенсивности, может в одном случае вызвать лечебный эффект, в дру-

гом — глубокую патологию. Вероятно, только механическим колебаниям при их действии на биологические объекты свойственно это исключительное явление. И это, следовательно, определяется самой физической природой вибрации.

Следует, однако, помнить, что биологический эффект действия вибрации не всегда и не обязательно должен быть связан с явлением резонанса. В данном случае явление резонанса при действии вибрации дает возможность объяснить наблюдаемый парадокс: одна и та же частота при одной и той же интенсивности в одном случае вызывает патологию, в другом — лечебный эффект. Патологические явления при действии вибрации возникают не обязательно лишь при наличии резонанса. Здесь могут быть по крайней мере три важнейших фактора, каждый из которых может оказаться решающим в определении дальнейшей судьбы объекта.

Прежде всего интенсивность вибрации. На ряде производств, на некоторых видах транспорта (вертолеты, тракторы, танки, подводные лодки) шумы и вибрация по интенсивности на 3—4 порядка выше веками сложившихся и привычных для человека интенсивностей. Понятно, что борьба с шумами и вибрациями такой интенсивности является в настоящее время, по словам академика А. А. Благонравова, одной из глобальных социально-экономических проблем.

Вторым фактором, который может оказать решающее влияние на возникновение патологических процессов, являются сопутствующие условия. Речь идет об условиях, в которых приходится трудиться человеку: температура, шумы, уровень радиации, содержание воздушной среды, атмосферное давление, физическое и моральное напряжение. Эмоциональное, психическое состояние человека при всех этих сопутствующих условиях приводит к тому, что действие вибрации с одними и теми же параметрами проявляется по-разному. К сожалению, проблема комплексного действия физико-химических факторов среды на биологические процессы является одной из сложнейших проблем в биологии, и потому, может быть, она разрабатывается крайне медленно.

Третьим, не менее важным сопутствующим фактором, является исходное функциональное состояние самого объекта. Биологам известно такое явление,

когда слабые воздействия на клетку повышают в ней интенсивность метаболических процессов. Но, если этот повышенный метаболизм уже каким-то фактором был вызван, тогда последующее, пусть даже слабое, воздействие вызывает обратный эффект — он будет подавлять активность метаболического процесса. Следовательно, говоря конкретно о действии вибрации, ее конечный эффект будет зависеть от того, каково было исходное функциональное состояние объекта, на который действует вибрация. Разумеется, на уровне клетки эта закономерность реакции обнаруживается весьма отчетливо. На целом организме, тем более на человеке, оценить исходное состояние в высшей степени трудно. Но тем не менее закономерность реакции на раздражение, как общебиологическая закономерность, сохраняется. Эта закономерность реакции на раздражение и является одной из ведущих причин того, что на одно и то же вибрационное воздействие при прочих равных условиях люди одного пола, возраста, стажа работы реагируют по-разному.

Все эти особенности биологического действия механических колебаний должны быть учтены при разработке теоретических основ вибротерапии. И начало этому положено авторами указанных выше книг. Здесь нет необходимости перечислять недуги, которые поддаются лечению с помощью вибрации — о них сказано в соответствующей литературе.

Надо полагать, что вибротерапия, как и в целом механотерапия, станет одним из ведущих лечебных и гигиенических факторов в медицинской практике.

### **МАССАЖ КАК СТИМУЛЯТОР БИОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ**

В истории медико-биологической деятельности, в истории врачевания есть такой лечебный прием, который как будто задан самой природой, он никем не открыт, никем не придуман. Таким приемом является массаж. Человек далеко ушел от своей поры эволюционного юношества и, конечно же, не помнит, какая ведущая сила в природе сделала его человеком. Ф. Энгельс в трех словах выразил суть этой фи-

лософии по отношению происхождения человека: «Труд создал человека». В те же годы физиолог И. М. Сеченов воздал должное человеческой руке, держащей резец скульптора или смычок музыканта, способный вызвать дивный мир звуков, расцветивая человеческое бытие. Сеченов показал, что в основе всего этого кажущегося чуда природы лежит элементарный акт мышечного сокращения. Мышца руки, творящей труд, создала человека. Она же создала ему духовный мир. И вот еще одно назначение руки, природой заданное. Об этом хорошо сказала сто лет тому назад д-р Бела Вейсс (1882): «Люди, — писала она, — при своей первоначальной беспомощности во всех жизненных обстоятельствах прибегали к единственному средству — именно к руке. Она доставляла им пищу, одежду, жилище и защиту, в ней стали искать они облегчение, когда узнали, что такое боли. И теперь, если в каком-нибудь месте нашего тела, ощутив внезапно сильную боль, мы невольно хватаемся за него рукой». Рука — это природой заданный дар врачевания, и не только телесных ран, но и душевных обид; мать теплом и движением своих рук способна приласкать ребенка, утешить, снять горечь обиды.

Историки цивилизации свидетельствуют, что этот первородный прием человека в борьбе с недугами существовал повсеместно с древнейших времен, и нет народов, общин, племен, которым он был бы чужд, как нет племен и народов, которым можно было бы приписать приоритет первооткрывателя этого метода врачевания — массажа. Его никто не открывал, он — суть реакции на боль. Это скорее инстинкт, чем осознанный прием лечения. Одна из самых фундаментальных особенностей этого метода лечения — его биологичность. Само по себе действие массажа (растирание, пульсирующее сжатие и расслабление, легкое растяжение мышцы, ткани) непосредственно касается структур, выполняющих присущие им функции. Эти формы механического воздействия оказывают прямое влияние на метаболизм тканей этого органа.

По мере развития массажа как метода лечения к нему добавился еще один, в высшей степени биологически важный, физический фактор — термический. Массаж в сочетании с теплом оказался более эффективным приемом врачевания. Общественные бани

с древнейших времен являлись, выражаясь современным термином, терапевтическим центром, где массаж осуществлялся в комплексе с действием тепла. У греков и римлян, как вероятно и у всех народов древней цивилизации, бани и процедуры, совершаемые там в виде телесных упражнений, растираний с различными благовонными маслами, служили не только врачеванием, но и восстановлением физических сил, стимуляции мужества, бодрости духа, телесной красоты. Не случайно древние греки бани посвящали одному из могущественнейших богов, воплощающему красоту и силу, — Геркулесу. С помощью массажа снималась усталость мышц гладиаторов, развивалась их сила, красота тела. Обычай снимать усталость с помощью различных приемов массажа был, вероятно, распространен широко. Так, историк, сопровождавший Кука в его мореплаваниях, отмечал обычай таитян снимать усталость у путешественников различными приемами массажа, причем в специальных жилищах типа бань, с использованием тепла. Бани, как и массаж, существуют с древнейших времен у всех народов и служили двойной цели: и как гигиенический фактор, часто имеющий обрядовое значение, и как лечебный. Судя по литературным источникам, бани существовали и в древнем Египте, и у арабов, и у китайцев, и вряд ли, как и массаж, можно было бы приписать какому-либо одному народу их создание. Всего вероятнее, это выражение естественной потребности, свойственной человеку, в гигиене и врачевании. Следовательно, своеобразные лечебно-гигиенические предприятия возникали у племен и народов независимо, в соответствии с географическими условиями и уровнем их развития.

У славян, особенно в северных широтах, бани также были широко распространены. Наиболее характерной особенностью славянских (русских) бань было наличие парилок и использование березовых (преимущественно!) веников, которые заменяли лечебный массаж. Кажется, нет такого недуга в человеческом теле, от которого славянин не пытался бы избавиться в парилке с помощью веника. Бани в России также существуют уже много веков. По свидетельству историка медицины Д. М. Росийского, еще внука Владимира Мономаха, жившая в XII в., указывала на широкое распространение бань.

Итак, с древнейших времен массаж в более широком его понимании служил трем целям: гигиеническим, лечебным и эстетическим. Здесь нет необходимости приводить теперь уже общеизвестные факты не только терапевтического, но и общефизиологического действия массажа. Достаточно сказать, что едва ли в наше время найдется терапевтическое или хирургическое отделение, которое не пользовалось бы услугами массажа. Следует лишь подчеркнуть поистине тотальное биологическое действие массажа как механического раздражителя. В зависимости от способа воздействия и от интенсивности, массаж активирует метаболические процессы, повышает или, напротив, понижает нервную возбудимость, устраняет (понижает) болевые ощущения, восстанавливает функции парализованных конечностей. Наконец, общий массаж нормализует душевный мир человека, его положительные эмоции, его отношение к внешнему миру. Таков всеобъемлющий характер биологического действия одного из механофакторов.

До сих пор мы обходили столь же древний, как и массаж, способ своеобразного врачевания — физические упражнения. Развитие спорта шло параллельно, а вернее сказать вместе с массажем, так как в обоих случаях речь идет о механическом воздействии на структуру органов, хотя назначение его во все периоды развития носило скорее социальный, чем медико-биологический характер. Развитие красоты форм, силы, выносливости, духовного мужества — вот основные человеческие достоинства, развивать и совершенствовать которые призван спорт. Но независимо от назначения в жизни человека и общества массажа и спорта их объединяет одно общее биологическое начало: в обоих случаях речь идет об одной и той же биологической структуре, об одном и том же биологическом объекте. Более того, речь идет о действии механического фактора на одни и те же биологические процессы человека. На протяжении всей своей истории спорт несет двойную службу: медико-биологическую и социальную. Однако один из видов спорта, а именно гимнастика, зарождался как лечебный прием, и сейчас, как известно, существует специальный раздел этого вида спорта — лечебная гимнастика. Началом современной лечебной гимнастики считают XIX в. когда в Стокгольме

д-р Линг создал специальный институт врачебной гимнастики. В России подобный институт был создан в Петербурге тоже в самом начале XIX в. Теперь лечебная гимнастика, наряду с массажем, широко применяется во всех странах мира. За прошедшее столетие разработаны многочисленные приемы лечения с помощью гимнастики самых различных систем организма: кровообращения, сердечной деятельности, неврозов, опорно-двигательной функции и др. Следует к этому добавить, что к услугам врачей в настоящее время имеется огромный арсенал технических средств, что несомненно расширяет диапазон механотерапии в лечебной практике.

### СЕНСОРНЫЙ ГОЛОД — ПАРАДОКС XX века

Сравнительно недавно в научно-популярной литературе появился и стал модным термин *сенсорный голод*. Речь идет о том, что человеку не хватает раздражителей. Это действительно звучит парадоксально! В век НТР, когда звуки, вибрации, радиации, термические и химические факторы в количественном отношении многократно превышают привычные для человека уровни. И тем не менее для такого утверждения есть основания. Сенсорный голод — явление, к сожалению, вполне реальное, и, так же как гиподинамия, он порожден НТР. В его основе лежат две причины, различные по своей биологической природе.

Во-первых, сенсорный голод может быть в буквальном смысле голодом, т. е. связан с недостатком раздражителей. Такое явление возможно в специфических производственных условиях. Биологической основой этого голода является нарушение эволюционно привычной среды, в которой человек вынужден находиться. Мы уже подчеркивали, что животный мир и человек развивались в условиях постоянно действующих на Земле всех физических факторов. Мы более или менее хорошо знаем значение физических факторов, для восприятия которых в процессе эволюции созданы рецепторы. Но каково биологическое (и вредное, и полезное) значение тех факторов, к которым природа не сочла необходимым создавать рецепторы, например радиация, магнитные поля, различный вид космических излучений, инфра- и ультразвуковые колебания и другие?

Нужны ли они для биологических процессов? Какова степень их биологической необходимости? Этого, к сожалению, мы не знаем, и, как уже отмечалось выше, изучается пока лишь степень вредности, а не степень необходимости этих факторов.

В процессе трудовой деятельности, особенно в условиях НТР, все больше предприятий, в частности электронной промышленности, требуют особых, специфических условий, в которых исключались бы всякие колебания воздуха, температуры, влажности, освещенности, требуется экранизация помещений от внешнего мира. Создается искусственная, строго контролируемая среда. Нет ничего удивительного, что в этой среде отсутствуют те, пока еще мало изученные человеком, физические факторы, которые были его спутниками в процессе эволюции. И еще одно биологически важное явление, которое несомненно усиливает дефицит раздражения. Строжайшее постоянство интенсивности освещения, температуры, состава и движения атмосферы — монотонность этих факторов делает их биологически неактивными, они перестают быть специфическими раздражителями. Впрочем, как и всякий монотонный, машинообразный труд не стимулирует биологические процессы, а лишь ускоряет утомляемость. Таким образом, искусственно создаваемый микроклимат и является источником дефицита раздражения (сенсорного голода).

Второй причиной дефицита раздражения является, как бы странно это ни звучало, — чрезмерность раздражений. Вибрация и звук по своей интенсивности иногда оказываются в миллионы раз выше эволюционно сложившегося порога раздражения. В процессе длительной эволюции у животных и человека выработана способность воспринимать раздражения определенного (оптимального!) уровня ритма и интенсивности. Уровень интенсивности раздражителя ниже и выше порога раздражения создает в возбудимых системах особое функциональное состояние: подпороговое раздражение повышает лабильность, стимулирует обменные процессы, повышает возбудимость, надпороговое — вызывает угнетающий эффект, блокируется передача возбуждения. Условный рефлекс, выработанный на определенную частоту и интенсивность, например ударов метронома, нарушается или даже вообще исчезает при из-

менении этой частоты или интенсивности. Тот уровень интенсивности раздражителей (звука, света, радиации), который необходим для нормальных биологических процессов, в условиях НТР часто заменяется таким уровнем раздражения, который вместо обеспечения нормального течения жизнедеятельности вызывает патологические процессы, являясь фактором, разрушающим веками сложившуюся гармонию жизни со средой. В этих случаях и наблюдается дефицит истинного и необходимого раздражения, сенсорный голод!

Нельзя не видеть, что проблема сенсорного голода является частью общей проблемы века — гипокинезии. Как уже подчеркивалось, проблема гипокинезии и ее биологическое происхождение — проблема социальная. Решение ее находится в компетенции общества, которое в зависимости от уровня социального развития создает образ жизни человека: его интеллектуальное, нравственное, физическое воспитание, его труд и отдых. Это и есть путь борьбы с гипокинезией и с сенсорным голодом.

Мы рассмотрели биологическую роль механических колебаний — звука и вибрации в жизни животных и человека в трех аспектах.

Первый касается эволюционного значения механических колебаний. Едва ли когда-либо естествоиспытатели сомневались в биологической значимости звука и вибрации в жизни животных. «Исследовательский инстинкт» побуждал человека к познанию окружающего мира. Плоды этой потребности к исследованию практически необозримы. Биологов в первую очередь интересовал вопрос о чувствительности живых объектов к механическим колебаниям и, следовательно, к структурам, воспринимающим этот вид энергии. Именно в этой области наука достигла наибольшей полноты знаний. Все ныне известные виды животных на Земле исследованы на предмет их чувствительности к звуку и вибрациям. Это — драгоценный, ни с чем не сравнимый фонд человеческих знаний. Наряду с этим столь же обширными являются исследования экологического значения механических колебаний. И, наконец, за последнее столетие наука раскрыла и новый мир явлений, касающихся роли вибрации и звука в жизни животных и человека. Речь идет о сигнальном значении этого фактора: звук и вибрация в процессе эволюции животных стали приобретать популяционное, общественное и социальное значение.

По ходу изложения данных о чувствительности животных различных уровней эволюционного развития к механическим колебаниям мы обратили внимание — и это мы не раз подчеркивали — на отсутствие данных о прямом действии этих факторов на биологические системы: клетку, ткани, организм. Кажется странным и исторически трудно объяснимым отсутствие любопытства выяснить первостепенной важности вопрос: как действуют механические колебания на организм и его

ткани? Вероятно, это объясняется тем, что проявилась общая историческая закономерность: вначале исследовать феноменологию явлений, то, что лежит на поверхности, и лишь на следующем этапе познания затрагиваются фундаментальные процессы этих явлений. Так, например, шло познание биологического действия радиации. Пробел в науке, касающийся прямого действия механических колебаний на биологические структуры, был заполнен лишь в первую половину нашего века.

Анализируя литературные и собственные данные, мы приходим к выводу, что механические колебания типа звука и вибрации выполняют двоякую роль, которую мы и называем первичной и вторичной. Ранее для такого деления оснований не было, поскольку мы ничего не знали о том первородном, изначальном действии механических факторов на живые структуры. Казалось очевидным, что звук и вибрация как-то действуют на клетку, нарушают или даже разрушают ее структуру, иначе невозможно объяснить причины возникновения механорецепторов. И тем не менее лишь за последние 50—60 лет появились экспериментальные доказательства прямого (не через рецепторы) действия на клетку звуковых колебаний.

С учетом этих данных и в соответствии с современным уровнем наших знаний о взаимодействии механических колебаний с биологическими объектами теперь уже имеется возможность дать более полное представление о биологической роли звука и вибрации в жизни животных и человека на протяжении всей их эволюции на Земле. Эта проблема подробно обсуждалась выше.

Второй аспект проблемы касается патологического действия вибрации и звука, одного из парадоксов XX в. Как понять, чем объяснить, что звуковые колебания, создавшие человеку его душевный мир, украшавшие его быт, вместе с тем угрожают его биологическому благополучию?

Общепринятой точкой зрения является признание того, что звук и вибрация в век НТР по интенсивности в миллионы раз выше порога интенсивности, сложившегося у животных и человека в процессе эволюции.

В принципе такая точка зрения не лишена оснований. Действительно, в ряде случаев могут встречаться, например, взрывные звуки, мощностью в миллионы раз выше привычного для человека звука. Подобные звуки,

как и вибрации, представляют собой случаи экстремального порядка и, следовательно, не являются постоянно действующими факторами. Так же, как, например, раскаты грома едва ли имели и имеют какое либо эволюционное (биологическое) значение.

Конечно, в условиях НТР интенсивность звука (шума) и вибрации несомненно повысилась. Однако в условиях производства это повышение едва ли достигает 10-кратной величины, т. е. на 1—2 порядка выше установившегося в процессе эволюции порога интенсивности. Попытка объяснить патологическое, биологически опасное для человека действие только высокой интенсивностью не имеет достаточных оснований; природа возникновения патологических явлений в результате действия шума и вибрации намного сложнее. Она связана со специфическим действием механических колебаний на живые системы, с суммарным действием сопутствующих физических факторов окружающей среды, с организацией труда и не в последнюю очередь с социальным климатом трудового коллектива. Речь при этом идет не только о нравственной атмосфере, но и просто об уровне громкости человеческой речи и, что очень важно, ее содержания. Не случайно поэтому в характеристике вибрационной и, в особенности, шумовой болезни главным компонентом являются нервно-психические расстройства.

Мы уже говорили о заболеваемости Вибрационной и шумовой болезнями. Эти болезни — плата общества за свое невежество в данной области науки и невежество социальное, касающееся организации труда людей. Сами по себе вибрация и звук как физические факторы не только не противопоказаны жизненным процессам — напротив, они для них необходимы. В деталях наше невежество заключается в том, что мы до сих пор не знаем, есть ли разница в реакциях на вибрацию, например, различных клеток нервной системы: чувствительных, двигательных, клеток симпатических ганглий, различных клеток головного мозга. Мы вообще не знаем, есть ли различия в чувствительности к вибрации, например, между сердечной мышцей и скелетной мускулатурой, клетками эпителия, костного мозга и др.

На клеточном уровне исследований мы располагаем единственным, но действительно фундаментальным фактом — вибрация подавляет митотическую актив-

ность клеток, клетки перестают делиться. В других условиях вибрации наблюдается стимуляция синтетических процессов в клетке. Казалось бы, ясен путь поиска: найти параметры вибрации, которые будут подавлять деление, например, раковых клеток; а также найти и такие параметры, которые будут стимулировать рост и размножение клеток, необходимых для организма, например при заживлении ран, регенерации тканей и т. п. К сожалению, подобных исследований пока нет. В СССР нет ни одной лаборатории, где бы в деталях исследовали механизм биологического действия звука и вибрации на различные структурные образования живой материи: нуклеопротеидные комплексы, субклеточные структуры (ядра, митохондрии, рибосомы), на клетки различного (эмбрионального) происхождения и различного функционального назначения, например на нервные клетки, половые и соматические клетки. Только знание природы и механизма биологического (а не физического!) действия этих факторов, природы и механизма реакции разнообразных биологических систем на это действие гарантирует возможность грамотных рекомендаций по организации труда.

Третий аспект проблемы касается вопроса роли звука и вибрации в качестве союзников человека.

Что мы знаем о полезном действии для человека механических колебаний? В третьей главе мы подчеркивали, что польза механических колебаний для человека заключается в их биологической необходимости. Вместе с другими факторами среды они формировали биологические структуры, обеспечивали необходимые метаболические процессы, стали самым мощным средством (каналом) связи развивающихся живых систем с внешним миром, и на вершине эволюции жизни на Земле они стали творцом и выразителем состояния душевного мира человека. Это историческая, эволюционная заслуга механических колебаний. Теперь ставится чисто прагматическая задача — привлечь вибрации и звук к себе в союзники.

В заключение следует сказать, что на исходе XX в. становится все более очевидным, что судьба человека, его будущее зависят от Разума. Другой силы, определяющей будущее человечества, в природе нет. В процессе эволюции жизни на Земле разум в борьбе за существование одержал победу. В борьбе с грозной

стихией природы — победа так же оставалась за ним. Биосфера завоевала жизненное пространство планеты. Теперь наступает новая эпоха жизни на Земле, по выражению В. И. Вернадского, — ноосфера — когда законодателем всего бытия становится разум.

Необходимо, однако, помнить уроки истории, когда не разум, а безумие одерживало победу.

- Андреева-Галанина Е. Ц.* Вибрации, их гигиеническое значение и борьба с ними. Л., 1940. 221 с.
- Андреева-Галанина Е. Ц., Алексеев С. В., Кадыскина А. В., Суворов Г. А.* Шум и шумовая болезнь. Л., 1972. 303 с.
- Артамонова В. Г., Шатилов Н. Н.* Профессиональные болезни. М., 1982. 415 с.
- Беклемешев К. В.* Экологические основы биогеографии пелагии // Экология водных организмов. М., 1966. С. 14—24.
- Благонаров А. А.* Речь на открытии симпозиума // Влияние вибрации различных спектров на организм человека и проблемы виброзащиты. М., 1972. С. 5—8.
- Вибрационная болезнь в условиях современного производства. Новосибирск, 1980. 111 с.
- Вибрационный массаж в эксперименте и клинике. Томск, 1980. 119 с.
- Вибротерапия: Сб. науч. трудов. Томск, 1985. 122 с.
- Глембоцкий Я. Л.* Генетические исследования в космосе // Космич. исслед., 1970. Т. VIII, вып. 4. С. 616—627.
- Диментберг Ф. М., Фролов К. В.* Вибрация в технике и человек. М., 1987. 159 с.
- Казначеев В. П.* Проблемы экологии человека. М., 1986. 137 с.
- Кошелев Н. Ф.* Научно-технический прогресс и гигиена: Актовая речь. Л., 1976. 31 с.
- Кузин А. М.* Стимулирующее действие ионизирующих излучений на биологические процессы. М., 1977. 134 с.
- Лобзин В. С., Михаленко А. А., Панов А. Г.* Клиническая нейрофизиология и патология гипокинезии. Л., 1979. 215 с.
- Милн Л., Милн М.* Чувства животных и человека. М., 1966. 302 с.
- Насонов Д. Н.* Местная реакция протоплазмы и распространяющееся возбуждение. М.; Л., 1959. 434 с.
- Отелин А. А.* Сравнительно-морфологические данные о приспособляемости кожной рецепции давления у зрячих и слепых людей // Арх. анат. гистол. эмбриол. 1961. Т. 41, № 7. С. 72—84.
- Охнянская Л. Г., Мишин В. П.* Хронобиология и хронопатология. М., 1981. 192 с.
- Охнянская Л. Г., Никифорова Н. А., Николаева Л. Н.* К механизму действия вибрации на человека // Гигиена труда и профзабол. 1987 № 1. С. 27—30.
- Парибок В. П.* Препарационные системы клетки и вопрос об их чувствительности к лучевому воздействию // Цитология. 1967. Т. 9, № 12. С. 1449—1459.
- Проблемы экологии человека. М., 1986. 141 с.
- Проссер Б. Л., Браун Ф.* Сравнительная физиология животных. (Пер. с англ.). М., 1967. 369 с.

- Романов С. Н.* Биологическое действие механических колебаний. Л., 1983. 209 с.
- Селье Г.* Стресс без дистресса. М., 1979. 125 с.
- Сеченов И. М.* Избр. соч. М., 1952. Т. 1. Физиология и психология. 771 с.
- Ухтомский А. А.* Собр. соч. Л., 1950. Т. 1: Учение о доминанте. — 328 с.
- Фабри К. И.* Классификация игр животных // Бюл. Моск. общ. исп. пр. Отд. биол. 1984. Т. 87, вып. 6. С. 57—65.
- Федоров И. В.* Обмен веществ при гиподинамии. М., 1982. 253 с. (Пробл. косм. биологии; Т. 44).
- Фратрич И., Халуца К., Кралик Ю.* Троянский конь цивилизации. (Пер. с словацкого). М., 1977. 247 с.
- Черниговский В. Н.* Нейрофизиологический анализ кортиковисцеральной рефлекторной дуги. Л., 1967. 110 с.

# О Г Л А В Л Е Н И Е

---

В в е д е н и е . . . . .	3
<b>Г л а в а 1. Чувствительность животных к вибрации и звуку. Биологическое значение этих колебаний . . . . .</b>	<b>7</b>
Чувствительность к вибрации и звуку биологических объектов, не имеющих механорецепторов . . . . .	11
Чувствительность механорецепторов животных к звуку и вибрации . . . . .	19
Биологическое значение вибрации и звука . . . . .	52
Биологическое действие слышимого звука . . . . .	57
Биологическая потребность в звуковых раздражителях . . . . .	62
<b>Г л а в а 2. Вибрация и звук — источники патологических процессов . . . . .</b>	<b>68</b>
Реакция клеток и тканей организма на механические колебания . . . . .	72
Морфологические изменения в организме при вибрации . . . . .	77
Действие слышимого звука на клетки и ткани организма животных . . . . .	81
Действие низкочастотной вибрации на клетки и ткани организма . . . . .	86
Совместное действие шума и вибрации на организм животных и человека . . . . .	90
Действие шума на организм человека и животных . . . . .	92
Переносимость вибрации и звука . . . . .	95
Генетический эффект действия вибрации и звука . . . . .	98
<b>Г л а в а 3. Биологическая необходимость действия звука и вибрации . . . . .</b>	<b>111</b>
Биологическая потребность действия механических колебаний . . . . .	118
Стимуляция биологических процессов звуком и вибра- цией . . . . .	123
Биологическая роль механических факторов и проблема гиподинамии . . . . .	132
Вибрация как лечебный фактор . . . . .	140
Массаж как стимулятор биологических функций . . . . .	145
Сенсорный голод — парадокс XX века . . . . .	149
З а к л ю ч е н и е . . . . .	151
Л и т е р а т у р а . . . . .	156

*Научное издание*

**Сергей Никитич Романов**

**БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ  
ВИБРАЦИИ И ЗВУКА:  
Парадоксы и проблемы XX века  
(От молекулы до организма)**

*Утверждено к печати  
Редакционной коллегией серийных изданий  
Академии наук СССР*

Редактор издательства *К. А. Ланге*  
Художник *Е. В. Кудина*  
Технический редактор *О. В. Иванова*  
Корректор *Н. И. Журавлева*

ИБ № 44521

Сдано в набор 06.08.90. Подписано к печати 26.02.91.

Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага офсетная.

Гарнитура литературная. Печать офсетная. Фотонабор.

Усл. печ. л. 8.40. Усл. кр.-от. 8.55. Уч.-изд. л. 8.83.

Тираж 1850. Тип. зак. № 612. Цена 1 р.

Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство «Наука».  
Ленинградское отделение.

199034, Ленинград, В-34, Менделеевская лин., 1.

Ордена Трудового Красного Знамени  
Первая типография издательства «Наука».  
199034, Ленинград, В-34, 9 линия, 12.