



АЛЕКСЕЙ НАСРЕТДИНОВ

**Физика
и анатомия
музыки**



АЛЕКСЕЙ НАСРЕТДИНОВ

Физика и анатомия музыки

Издание специальное, предназначенное
для «умников и зануд», с дополнительным
материалом для «расслабленных и гуманитариев»

Физика

Как родилась эта книга.....7

Вступление.....9

- 1.1. Источники звука
и среда распространения,
без этого никак
не обойтись.....15
- 1.2. Что такое звук с точки
зрения физики?.....15
- 1.3. Характерные
параметры звука.....18
- 1.4. Обертоны, гармоники.....22
- 1.5. Гармонические ряды.
Сложный и простой
тон.....31
- 1.6. Звуковая краска.
Тембр.....35
- 1.7. Связь объективных
и субъективных
характеристик звука.
Какие звуки мы вообще
способны слышать?.....46

Анатомия

- 2.1. СТРОЕНИЕ УША
(ВНЕШНЕГО, СРЕДНЕГО,
ВНУТРЕННЕГО).....67
- 2.2. КАК РАБОТАЕТ СЛУХОВАЯ
СИСТЕМА ЧЕЛОВЕКА?.....69
- 2.3. КАК МЫ ОПРЕДЕЛЯЕМ
ВЫСОТУ ЗВУКА?.....78
- 2.4. НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА
СЛУХА.....88
- 2.5. БИНАУРАЛЬНОЕ СЛИЯНИЕ
ЗВУКОВ И БИЕНИЯ.....94
- 2.6. СЛУХОВАЯ МАСКИРОВКА
И ДЕМАСКИРОВКА,
«ЭФФЕКТ ВЕЧЕРИНКИ».....95
- 2.7. ОРГАНЫ СЛУХА
У ЖИВОТНЫХ.
ПРО КОМАРОВ И НЕ...98
- 2.8. ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКОВ
С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ
НЕЙРОФИЗИОЛОГИИ.
МУЗЫКА МОЗГА. «ЭФФЕКТ
МОЦАРТА».....110
- 2.9. «СЛУШАЕМ ПЕЧЕНЬЮ».....132

Музыка

- 3.1. АКУСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
КОНСОНАНСОВ
И ДИССОНАНСОВ.....137
- 3.2. МУЗЫКАЛЬНЫЙ СЛУХ.....148
- 3.3. АБСОЛЮТНЫЙ МУЗЫКАЛЬНЫЙ
СЛУХ.....150
- 3.4. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ,
ИЛИ ИНТЕРВАЛЬНЫЙ,
СЛУХ.....159
- 3.5. ВНУТРЕННИЙ СЛУХ.....162
- 3.6. ТЕМБРАЛЬНЫЙ, ИЛИ
ИНТОНАЦИОННЫЙ, СЛУХ.....164
- 3.7. ПОЛИФОНИЧЕСКИЙ
И ГАРМОНИЧЕСКИЙ СЛУХ.....171
- 3.8. СПОСОБНОСТЬ
К ИМПРОВИЗАЦИИ.....175
- 3.9. ЧУВСТВО РИТМА.....180
- 3.10. ЧУВСТВО МУЗЫКАЛЬНОЙ
ФОРМЫ (КРУПНОЙ ФОРМЫ,
АРХИТЕКТОНИЧЕСКИЙ
СЛУХ).....183
- 3.11. «ЦВЕТНОЙ СЛУХ».....187
- 3.12. НАСЛЕДОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ
МУЗЫКАЛЬНОГО СЛУХА.....191
- 3.13. МУЗЫКАЛЬНЫЕ СТРОИ.....198
- ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....208
- РАЗЪЯСНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ
ПОЛЕЗНЫХ СЛОВ.....210

Посвящается моей учительнице музыки
Наталье Александровне Становой
и моему учителю математики
Александру Николаевичу Волкову

Только глухие

Всё слышат

Только слепые

Всё видят

Только немые

Поют песни

Виктор Соснора

КАК РОДИЛАСЬ ЭТА КНИГА

Почему эта книга называется «Физика и анатомия музыки»?

Что такое музыка — понятно. Физика — это тоже более или менее понятно. Анатомия — не очень понятно, но ее тоже где-то изучают. Зачем всё в кучу-то смешивать?!

Дело в том, что с детства меня мучило несколько вопросов. А ведь почти все вопросы, которые нас действительно интересуют на протяжении всей жизни, идут из детства. Вот и у меня они пришли из детства. Вопросы, на которые я не смог получить ответа ни в музыкальной школе, ни на уроках биологии и физики. Какие это были вопросы? Очень простые, но моим учителям по музыке и физике казались идиотскими.

Например: почему в музыкальной гамме 12 нот, а не 13 или 9? Почему на пианино выбрали 7 белых клавиш, а остальные покрасили в черный цвет? И как человек, ребенок запоминает мелодию и, самое главное, зачем он ее запоминает?

Другая часть вопросов пришла из общеобразовательной школы. На уроках биологии мы изучали устройство уха. Даже тогда мне было понятно, что то, как работает наше ухо, совершенно не понятно ни преподавателю биологии, ни авторам учебника. Какая-то хилая и неубедительная конструкция из маленьких косточек: молоточка, наковаленки и стремечка. Не нужно было быть кандидатом физико-математических наук, чтобы понять, что молоточек не может стучать по наковаленке 440 раз в секунду, воспроизводя ноту ля 1-й октавы. Да и тембр, очень важная для человека вещь, то, с помощью чего мы отличаем звук скрипки от звука органа, при таком объяснении как-то совсем пропадает. Короче говоря — ввали и школьные учебники и школьные учителя, а это как-то раздражало немного.

Было непонятно, что такое музыкальный слух. Почему считается, что хорошо, когда он есть, и плохо, если его нет? И можно ли его развить у ребенка или у взрослого? Чаше всего говорили, что у одного человека есть музыкальный слух, а у другого нет. А еще он бывает хорошим и не очень хорошим. А еще он бывает абсолютным и относительным. Все это говорили. Но было совершенно непонятно — что такое музыкальный слух с точки зрения анатомии? Да и физики. И с понятием «абсолютный слух» какая-то незадача. Думается, что он самый лучший, так ведь нет! Люди с абсолютным слухом иногда отвратительно играют на музыкальных инструментах, особенно в ансамблях. А тогда зачем он вообще нужен, если он совсем не нужен? И еще какой-то «цветной» слух есть, он-то зачем нужен?!

Было непонятно, почему некоторые сочетания звуков, музыкальные интервалы кажутся нам благозвучными, а некоторые — крайне неблагозвучными. Зачем и, главное, как устроила это природа? Если в музыке некоторые сочетания нот нам кажутся приятными, то как понять — какие кажутся, а какие не кажутся? Только опытным путем? А что же нам скажет наука на этот счет, какая-нибудь физика или биология?

Молчали школьные физика и биология.

Также при обучении музыке у меня возникало некое чувство протеста при прослушивании так называемых консонансных интервалов: октавы, квинты, кварты и терции. Если с тем, что октава звучит благозвучно, я мог более-менее согласиться, то квинты и кварты звучали с явными биениями, а терции звучали просто диссонансно! Даже на только что настроенных инструментах! Да что же это такое?! Какой-то заговор! Зачем называть неблагозвучно звучащие интервалы консонансными, тем более что можно чуть-чуть изменить настройку музыкального инструмента — и интервалы станут благозвучными. Почему бы так не сделать-то?

Непонятно.

Все эти непонятные вопросы долго копились и хранились в пыльном и темном чулане моей головы. Пока по окончании института я не решил их оттуда извлечь. Постепенно я стал отвечать на некоторые вопросы, часть ответов я записывал на бумаге, материалы накапливались.

Если и у вас возникали когда-нибудь похожие вопросы — прочитайте эту книгу, на какие-то получите ответы.

Однако, как часто, а точнее — всегда, бывает, получив ответы на какие-то простые вопросы, я наткнулся на очень сложные вопросы, на целые пласты сложных, могучих вопросов.

Во время увлечения китайскими чаями и китайскими девушками меня заинтересовал древний китайский трактат «И Цзин» (Книга Перемен), его связь с естественно-научными дисциплинами, симметрией в живой и неживой природе, музыкой и теорией управления.

Погружаясь в изучение трактата, я был вынужден более подробно изучить и китайский музыкальный строй, потом его связь с греческим, пифагорейским строем. А потом с индийским, арабским и пр.

Попутно встал вопрос о том, как вообще исторически формировались все эти музыкальные строи, почему они сформировались именно так, а не иначе. Обнаружилась прямая связь музыкальных строев с физикой, математикой звука, устройством нашего слухового аппарата и другими интересными, объективными вещами.

Я иногда рассказывал то, что мне удалось раскопать, на семинарах перед физиками, синологами или музыкантами. Выступал на радио и на небольших стадионах. Людям нравилось. Но слушатели моих выступлений на тему физики и анатомии музыки, китайской, индийской и прочей музыки часто — почти всегда — спрашивали меня: а где это все можно прочитать? Я не знал, что ответить. Называть 50 книг различных авторов? Однако некоторые работы порой настолько сложны для чтения неподготовленным человеком, что информация вообще не воспринимается.

В книге много прямых цитат из работ различных авторов. С большинством из них я достиг договоренности, что не буду ссылаться на них непрерывно в тексте, а сошлюсь один раз, в конце книги.

И еще. Последнее. Главным моим стремлением было соблюсти определенную строгость и научность изложения, подходов. Хотя баланс между строгостью изложения и доступностью материала не всегда удавалось сохранить.

Эта же книга предназначена в основном для «умников и зануд» с латентной тягой к гуманитарным дисциплинам и расслабленному образу жизни. То есть для таких людей, к которым я отношу и себя, — к людям, думающим в основном левым полушарием. Головного мозга?

Вот.

ВСТУПЛЕНИЕ

Значение звука и музыки на протяжении всего развития человеческой цивилизации трудно переоценить. Еще наши древние предки, не имевшие полноценного вербального общения, придавали огромное, часто мистическое значение природным звукам. Звуки грома, землетрясения и извержения вулкана, звуки ветра и шторма... Людям казалось, что за всей этой «музыкой» стоят могучие и неизведанные силы, что привело к обожествлению подобных явлений. Но люди довольно быстро выяснили, что различные ритмы, мелодии можно создавать и собственными силами, не дожидаясь прилета жаворонка или извержения вулкана. Главное, что характеризует звуки, музыку и ритмы, — они изменяют эмоциональное состояние и настроение человека.

Самые первые музыкальные инструменты имитировали звуки природы — бубны, простейшие деревянные трубы, элементарные колокольчики. Со временем музыкальные инструменты становились сложнее, а с развитием музыкальных инструментов стали появляться и специальные места для исполнения музыки. Сначала это были религиозные храмы и места отправления культов, позже амфитеатры, совершенные с точки зрения акустики. Удивительно при этом, что науки акустики как таковой в древние времена не существовало.

Первые известные нам опыты, касающиеся музыки, акустики, которые можно отнести к научному подходу, появились в VI веке до н.э. в Греции. Их проводили Пифагор и его ученики. Музыкальная теория Пифагора не ограничивалась лишь поиском благозвучных (консонансных) сочетаний звуков и их математических параметров. Его концепция охватывала также представления о гармонии Вселенной, единстве Бога, музыки и математики.

Приблизительно в это же время или чуть раньше, около III тысячелетия до н.э., в Китае император Хуан-ди (точнее, его помощник) изобрел свой музыкальный строй. Так же как и пифагорейский, он был идеально сконструирован математически. Более того, музыкальные строи Пифагора и Хуан-ди совпадают с точностью до мелочей. Однако поиски причин такого соответствия выходят за рамки данной работы.

Многие философы и историки называют время в районе VI века до н.э. «осевым временем» — периодом, когда одновременно в разных точках мира зародились мощнейшие философские, религиозные, научные школы. Это время, когда жили Пифагор, Будда Гаутама, Конфуций и Лао Цзы. Опять-таки в VI веке до н.э. Конфуций существенно расширил и углубил использование музыки в различных областях. Было создано даже целое министерство музыки Юэфу (Музыкальная палата), отвечавшее за правильную камертонную настройку всех музыкальных инструментов в Китае. Также оно следило за тем, чтобы при выполнении «правильных» ритуалов исполняли «правильную» музыку.

Аналогичные истории происходили примерно в то же время в Индии, на Ближнем Востоке, в Египте и в других местах.

Это показывает, что люди издревле придавали огромное значение музыке и поднимали ее статус до уровня государственной идеологии и главенствовавших тогда в высшем обществе философии и религии.

Вплоть до XII века ничего радикального в развитии теории музыки и акустики в Европе не происходило. Пока Г. Галилей не заявил, что в изучении колебательных процессов заключено будущее развитие науки в целом. Он был, пожалуй, первым ученым Нового времени, который попытался связать музыку как искусство с физикой и математикой. В XIX веке Г. Гельмгольц и Д.У. Рэлей создали учение об акустике. Работы Гельмгольца о резонаторах и слуховых ощущениях до сих пор считаются классическими. А теория звука Рэля входила в учебники по акустике практически без изменений на протяжении столетия.

В Китае же произошла довольно странная история. Конфуций в VI веке до н.э. собрал пять самых значимых трактатов, имевших важнейшее значение с точки зрения философии и развития человечества в будущем. Это так называемое «Конфуцианское пятикнижие». Туда входил и трактат «Юэ Цзин», посвященный музыке, часто упоминающийся в других рукописях. Но в IV веке (или около того) н.э. «знающие» люди изъяли сей трактат из всех библиотек и уничтожили его, мотивируя это тем, что не осталось уже «знающих» людей, а бестолковое применение «знаний», изложенных в трактате, может привести к разрушению всего человеческого социума, к войнам и созданию сети закусочных Макдоналдс. Так или иначе, в настоящее время доступны лишь фрагменты «Юэ Цзин». Цепь закусочных Макдоналдс создана, но человечество все еще существует. Хотя нашим мандаринам и ванам, возможно, стоило бы больше внимания уделять качеству услаждения слуха и желудка, не гонясь лишь за количеством.

Однако вернемся к собственно звуку. Его возникновению и распространению.

*Усложнять просто,
упрощать сложно.*

Лао Цзы

*И предал я сердце мое тому,
чтобы познать мудрость
и познать безумие и глупость;
узнал, что и это — томление духа.
Потому что во mnogой мудрости
много печали; и кто умножает
познания, умножает скорбь.*

Екклесиаст

Физика

- 1.1. Источники звука
и среда распространения,
без этого никак
не обойтись
- 1.2. Что такое звук с точки
зрения физики?
- 1.3. Характерные
параметры звука
- 1.4. Обертоны, гармоники
- 1.5. Гармонические ряды.
Сложный и простой тон
- 1.6. Звуковая краска.
Тембр
- 1.7. Связь объективных
и субъективных
характеристик звука.
Какие звуки мы вообще
способны слышать?



1.1. Источники звука и среда распространения, без этого никак не обойтись

Что такое звук? Точного ответа не существует. Различные науки и теории претендуют на то, что именно они обладают всей полнотой знаний об этом, да и вообще обо всем остальном на свете. Физики говорят одно, музыканты другое, поэты третье, а тибетские монахи молчат или мычат что-то непонятное. Хорошо бы привести мнения всех людей о том, что такое звук. Но здесь мы можем попасть в ситуацию, когда длина носа китайского императора определялась на основе усредненной фантазии всех китайцев, которые видели императора с его носом лишь на гравюрах. Статистическая выборка потрясающая, хотя результат никуда не годится. Поэтому ограничимся пока взглядом физиков. Ведь, как известно, науки делятся на две категории: физику и коллекционирование марок. Потом, постепенно подключим взгляды биологов, медиков, музыкантов и историков. Потом.

Звук — это то, что мы слышим. Физики говорят, что звук образуется тогда, когда что-то колеблется, какое-нибудь тело. Когда что-то меняет свою форму. Так как мы, люди, живем в воздушной среде, самые распространенные звуки для нас те, что распространяются в воздухе, газовой среде.

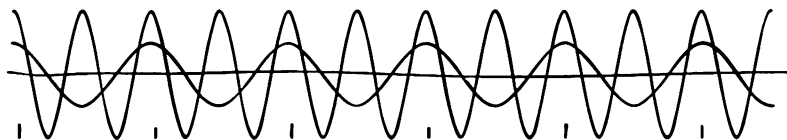
Так уж сложилось, что способность слышать звуки является для людей одним из шести способов чувствовать что-либо. Слух для людей играл и играет важную роль. Человек слышит грохот обвала, вой гиены, ругань соседа, свист пули. Вся эта поступающая информация увеличивает шансы человека на выживание. А без устной речи не возникло бы и всей современной цивилизации.

Итак, мы все поняли, что звук — это очень важно. Для живых существ, по крайней мере.

1.2. Что такое звук с точки зрения физики?

Звук — волна, распространяющаяся в среде. Газообразной, жидкой или твердой. Волны видели все. Волны на море, волны в океане, волны в заливе, волна, бегущая по веревке, если ее предварительно по-особенному дернуть, и т.д. Такие же волны распространяются и в воздухе. Для

волн на воде средой является вода, точнее — видимая граница воды и воздуха. Нам кажется, что частички воды колеблются по вертикали¹.



Поперечная волна.

Такого типа волны бегут по натянутой веревке, струне и т.д.

Частички воздуха, рождая звук, тоже колеблются. Но воздух прозрачен, и мы не видим его колебаний. Зато наше ухо может воспринимать колебания плотности и изменение давления воздуха.

К изменению плотности воздуха, то есть к возникновению звука, приводит любое движение твердого тела. Это могут быть движущийся паровоз, колебание голосовых связок, натянутой струны и пр.



Продольная звуковая волна, распространяющаяся в воздухе

Однако не все волны одинаковы. Важно, с какой частотой колеблется струна, сколько колебаний в секунду она совершает. Если с высокой частотой — мы слышим высокий звук, а с низкой — низкий звук. Звук может быть громче или тише. На языке физики это означает, что частота и интенсивность (амплитуда) звуковой волны может быть разной, больше или меньше. Если амплитуда больше — звук громче, если меньше — звук тише. Это интуитивно понятно. Дальше будет хуже. Но я буду стараться.

Казалось бы, все звуковые волны должны быть одинаковыми. Иногда так действительно кажется, особенно когда слушаешь радио в машине: не только все звуковые волны одинаковы — все песни одинаковы, все машины одинаковы, все люди одинаковы. Но если отвлечься от этих размышлений, то понимаешь, что звуковые волны все-таки разные. Звуки скрипки, органа или автомобильного мотора в Большом зале Московской консерватории совсем не похожи на звуки скрипки, органа и мотора скутера, если ты плаваешь с маской и трубкой в Красном море, а органист или скрипач сидит на дне. Так же как и любые другие звуки. В чем же тут

¹ Точнее, не по вертикали, а совершая круговые движения.

дело? Думается, не только и не столько в устройстве двигателя внутреннего сгорания.

Часть первая

Физика

Что такое
звук с точки
зрения физики?

С точки зрения физики, за распространение волн в среде отвечают два фактора — инерция и упругость. Если среда более плотная и более упругая, то скорость звука в ней повышается, а длина волны при аналогичной частоте — увеличивается. Еще одним важным элементом среды является ее способность рассеивать энергию волны. Если бы звуки с расстоянием не затухали, то атмосфера была бы наполнена гигантским количеством разнообразных звуков, что рождало бы безумную какофонию.

Затухание звука в воздухе происходит по двум причинам. Во-первых, энергия волны, распространяющаяся в трехмерном пространстве во все стороны, падает пропорционально квадрату расстояния от источника звука. Постепенно энергия колебания частиц воздуха становится такой малой, что не различается на фоне теплового движения молекул. Во-вторых, важным фактором уменьшения (диссипации) энергии звука является рассеивание звука на неоднородностях среды — частичках пыли, комарах, меняющейся плотности воздуха из-за разницы температур, влажности и т.д. Известно, что звук в ясную, сухую, безветренную погоду распространяется совсем по-другому, чем в пасмурную, дождливую, ветреную и мерзкую, когда и звуки-то слушать никакие не хочется. Например, все мы плавали на лодочке в парке. Прекрасная погода, солнышко, тихо, у нас благодатное настроение. Со всех сторон доносятся шепот, невнятное бормотание и всхлипы влюбленных, которые могут плавать на лодочке даже достаточно далеко от вас. Но слышали ли вы подобные звуки, если идет проливной дождь, сыро, холодно, на лодочке кататься совсем не хочется, а надо?! Нет, не слышали.

То, что для распространения звука нужна среда, было совсем не очевидно нашим предшественникам. Известны опыты А. Кирхера и О. Гюкке, которые помещали звонок под колпак, а из-под колпака выкачивали воздух. В результате они сделали вывод, что для распространения звука воздух не нужен. Однако гораздо позже было доказано, что в этих опытах звук распространялся через подставку под звонок, а уже через нее — в окружающее пространство, воздух.

Звук в воздушной среде, представляющий собой колебания плотности газа, чередующиеся уплотнения и разрежения, достигает барабанной перепонки, заставляя ее колебаться чисто механически, как маленький барабан. Далее, через цепь механических, электрических, химических приспособлений, таких как стремечко, улитка, нервные клетки, нейросеть, звук (голос, музыка) воспринимается человеком как образ. Но звук поступает в слуховой аппарат человека не только через барабанную перепонку. Через колебания костей черепа он попа-

дает непосредственно в среднее ухо и в искаженном виде добавляется к звуку, проходящему через барабанную перепонку. Вот почему восприятие собственного голоса «напрямую» в голове сильно отличается от записанного через внешний микрофон. Более того, свой голос в записи воспринимается человеком как «противный».

Также не всегда человек предпочитает воспринимать звук только через воздушную среду. Якуты, бушмены и железнодорожники спят, прикладываясь ухом к земле (к рельсу), чтобы заранее обнаружить приближающиеся стада оленей, бизонов и паровозов. Отдельные рыбаки берут в зубы конец толстого деревянного шершавого весла, опущенного в воду, чтобы слышать звуки подводного мира.

Известно, что скрипачи и настройщики, у которых с возрастом снижается слух, дотрагиваются зубами до вибрирующего смычка или другого твердого предмета, прислоненного к резонатору инструмента, для того чтобы лучше слышать музыкальный звук.

Про Бетховена, пожалуй, говорить не будем, все о нем слышали. Был он глухим начиная с какого-то времени, а музыку писал замечательную.

1.3. ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗВУКА

*Человек рождается мягким,
а умирает твердым.*

Лао Цзы

Все мы знаем, что звук в воздухе распространяется с некоторой скоростью. Если встать перед большой отвесной скалой или горой с крутым склоном и крикнуть, то мы услышим эхо. Почему мы его услышим? Звук от кричащего человека долетает до скалы, отражается от нее и летит обратно. Это занимает некоторое время. Чем ближе мы к скале, тем меньшее время пройдет. С помощью эффекта эха удобно измерять расстояние до какого-нибудь объекта. В природе этот эффект используют летучие мыши для ориентации в пространстве, а люди придумали эхолот для исследования профиля дна рек и морей или для поиска косяков рыб и пр.¹

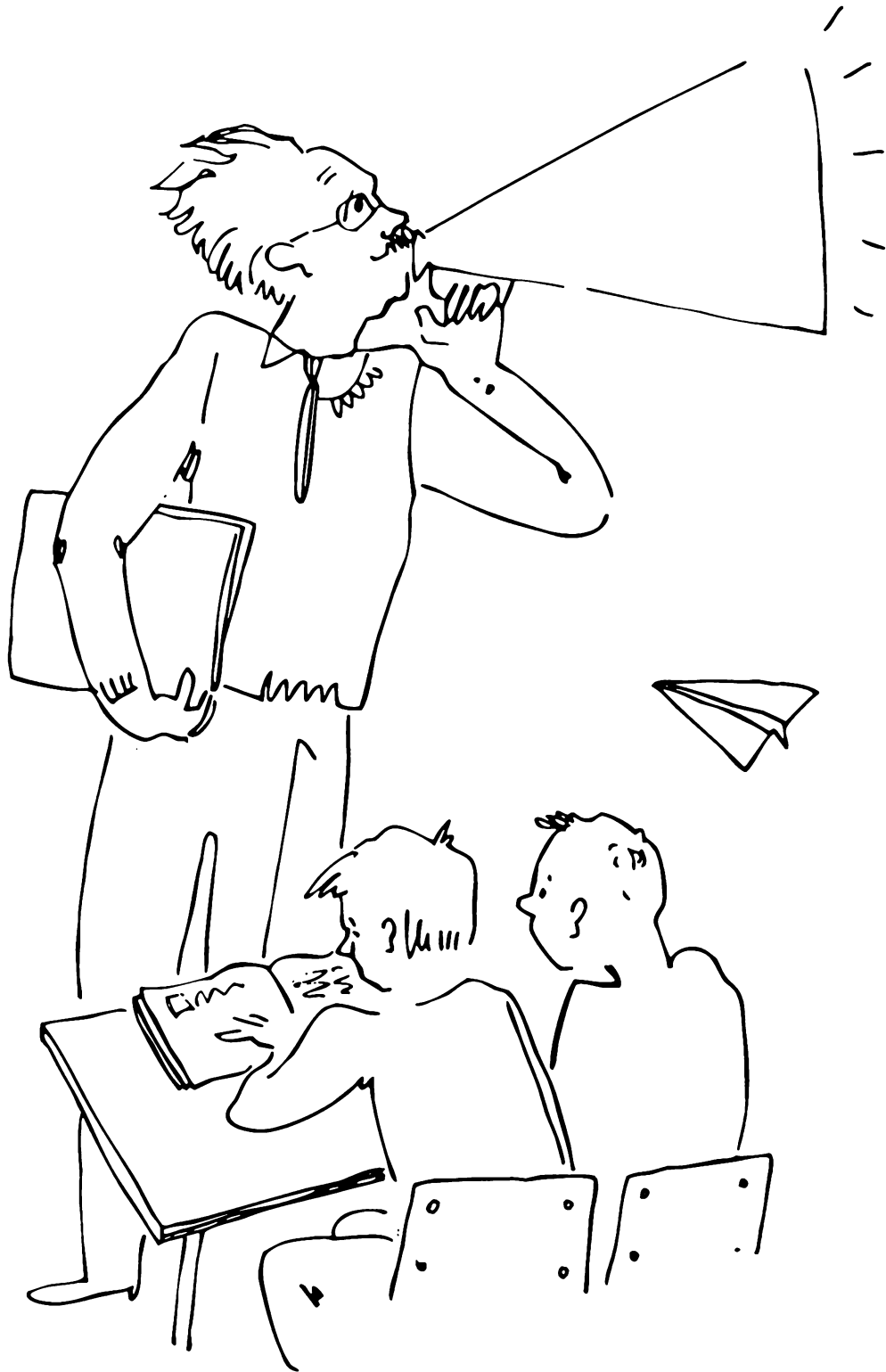
Можно определить расстояние до места, куда ударила молния, если засечь время, прошедшее между вспышкой молнии и звуком

¹ Выражаясь языком формул, это выглядит так: $C = 2L/t$,

где C — скорость звука

L — расстояние до объекта, от которого отражается звук

t — промежуток времени до получения отклика.



грома. Скорость звука при температуре воздуха 18–22°C составляет 340 м/с. При 0°C — несколько меньше. Свет распространяется практически мгновенно, со скоростью 300 000 000 м/с. Вжик — и всё. То есть если от вспышки молнии до появления раскатов грома прошло 7 секунд, то молния ударила на расстоянии около двух километров. Правда, здесь есть нюанс. Звук от удара молнии распространяется не только по воздуху, но и по земле. А скорость распространения звука по земле почти в 5 раз выше, чем по воздуху. Вот и получается, что человек слышит вначале рокот грома, звуки низких частот, пришедшие по земле, а потом слышит и раскаты грома, пришедшие по воздуху. Кстати, скажу пару слов о том, почему человек слышит не один звук грома, а именно раскаты грома, то громче, то тише на протяжении некоторого времени. Это происходит оттого, что молния, источник звука, довольно длинная, около километра и более (или менее). И звук, идущий к наблюдателю (слушателю), приходит из разных точек молнии за разное время. При этом звуки накладываются друг на друга, и вследствие интерференции результирующий, слышимый звук становится то громче, то тише. Это и есть «раскаты грома».

Я уже упоминал о частоте звука. Чем выше частота звука, тем выше нам кажется звучащая нота — до определенного предела, конечно. С частотой звука все более-менее понятно — эта величина отражает то, сколько раз в секунду происходит смена разрежения или уплотнения воздуха. Но нужно понять еще, что такое длина волны звука. Длиной волны называется расстояние между последовательными уплотнениями или разрежениями звукопроводящей среды. Если представить себе волну, бегущую по воде, то ее длина — это расстояние между соседними гребнями волны. Частота звука измеряется в герцах (Гц) — числом колебаний за одну секунду. Длина волны изменяется в метрах и сантиметрах. Чем больше частота звука, тем меньше его длина волны¹. И чем больше скорость звука, тем больше длина волны. Например, в воде, где скорость звука больше, чем в воздухе, раз в пять, при той же самой частоте звука длина звуковой волны будет существенно больше.

Кроме частоты, длины и скорости волны, звук (как и любая другая волна) характеризуется амплитудой колебаний. Амплитуда — величина, на которую частица отклоняется от своего равновесного состояния в процессе колебаний. Интересной и удивительной особенностью человеческого уха (и слуховых аппаратов некоторых животных) является то, что ухо способно воспринимать колебания амплитуды (на

¹ Между частотой, скоростью звука и длиной волны существует простая связь: $L = C/N$,

где L — длина волны

C — скорость звука

N — частота звука.

пределе слышимости) порядка 10^{-9} см. Создать подобный приемник искусственно даже при нынешнем развитии современных технологий практически невозможно. Точнее, невозможно создать акустический приемник с таким широким динамическим диапазоном воспринимаемых звуков — от очень-очень тихих до очень громких.

Важной характеристикой звука, непосредственно связанной с амплитудой, является интенсивность звуковых волн. Она измеряется в ваттах (Вт) на 1 см^2 и отражает поток энергии в единицу времени через единицу площади.

Интенсивность самых слабых звуков, воспринимаемых человеческим ухом, составляет 10^{-16} Вт/см². Самые сильные звуки, которые еще может слышать человек до появления болевых ощущений, имеют интенсивность 10^{-2} Вт/см². То есть сила тихих и громких звуков, воспринимаемых человеческим ухом, отличается в 10^{14} раз. В сто квинтиллионов раз. Квинтиллион в 1000 раз больше квадриллиона, который в 1000 раз больше триллиона, который в 1000 раз больше миллиарда, который в 1000 раз больше миллиона и т.д. Колоссальная величина! Чтобы не иметь дела с такими величинами, в акустике используются логарифмические единицы измерения — децибелы (дБ). Если интенсивность одного звука (I_1) отличается от интенсивности другого (I_2) на 1 дБ, то эту разность (К) вычисляют по формуле:

$$K = 10 \lg I_1/I_2^1$$

Например, если интенсивность одного звука отличается от интенсивности другого на 40 дБ, то это означает, что интенсивность одного больше интенсивности другого в 10 000 раз (10^4). Это очень много.

Не вдаваясь в математические подробности, нужно сказать, что интенсивность звука при распространении его в пространстве без ограничений падает пропорционально квадрату расстояния. Это следует из простой геометрии нашего трехмерного евклидова пространства. Где мы с вами живем. Конечно, каждый из нас живет так, как может, и там, где может, однако при этом мы все живем в евклидовом пространстве (и немного в римановом и геометрии Лобачевского, но это уже к Эйнштейну).

Традиционно для усиления звука использовали всякие приспособления в виде рупоров или воронок. Они не дают звукам речи оратора рассеиваться во все стороны равномерно, а слегка направляют звуковой поток в нужную сторону.

¹ Здесь $\lg$ — десятичный логарифм, логарифм по основанию 10.

1.4. ОБЕРТОНЫ, ГАРМОНИКИ

Говоря ранее о звуке и звуковой волне, мы имели в виду некую идеальную бесконечную волну с одной определенной частотой. Этаким бесконечно тянущийся звук одной высоты. Таких звуков, к счастью, в природе не бывает. Существующие звуки обязательно имеют начало и конец (например крик «Стой! Кто идет?!»), а также состоят из множества одновременно звучащих звуков разной частоты (разной высоты).

Для того чтобы продвинуться еще немного дальше, нам придется залезть в раздел физики — акустику. Относительно глубоко залезть. Без этого, к сожалению, не обойтись, так что придется потерпеть и немного помучиться.

Вспомним картину волн на воде. Каждый, кто смотрел на морские волны, замечал, что они не всегда одинаковые. То большая волна с шумом ударит о берег, то маленькая еле-еле его коснется. Кроме того, волны набегает на берег не с равными промежутками времени. Гребни волн не гладкие, как стекло, а покрыты всякими выпуклостями, впадинками, рябью. То есть можно сказать, что мы видим множество разнообразных волн, с различными частотами и амплитудами.

Абсолютно то же самое происходит и со звуком. Реальные звуки, будь то гудок паровоза либо нота *си-бемоль* или даже *ля*, взятые великим альтистом Башметом, состоят из множества звуков разной частоты и амплитуды.

Звуки, довольно условно, можно разделить на музыкальные и немusical. Музыкальные звуки можно пропеть с помощью рта, создать мелодию. Но тяжело пропеть звук бьющейся посуды или скрежет гвоздя по стеклу. Почему так происходит?

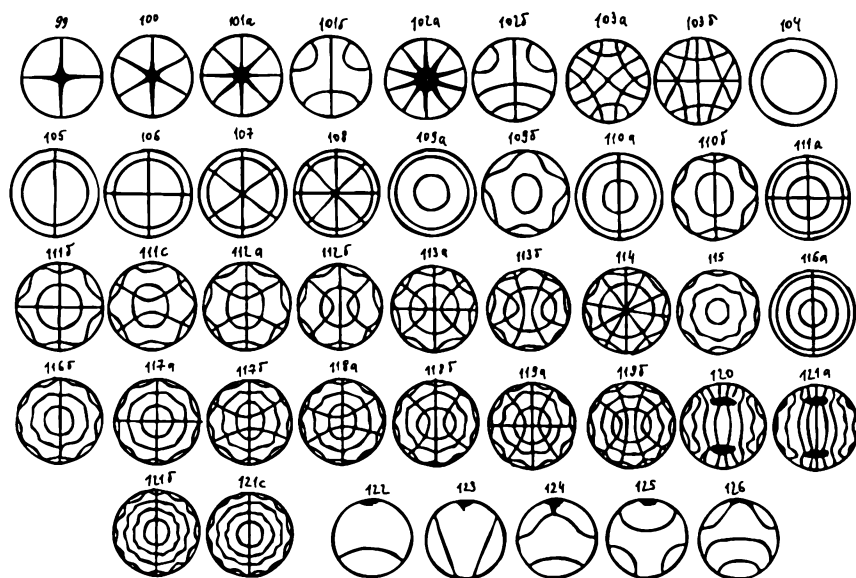
В музыкальных звуках можно выделить «главную» частоту звука. Как правило, это самая низкая частота из всего набора частот, входящих в состав звука, и эта частота, тоже, как правило, имеет самую большую амплитуду. Другие звуки (обертоны, гармоники) нашего сложного музыкального звука имеют частоты, относящиеся к частоте нашего базового звука как целые числа, то есть как $2/1$, $3/1$, $4/1$ и т.д. Удвоенная или утроенная частота базового звука. Такие множественные дополнительные звуки кратной частоты называются гармониками. То есть если мы взяли на рояле ноту *ля* 1-й октавы, которая, как известно, соответствует частоте 440 Гц, одновременно со звуком частоты 440 Гц рождаются дополнительные звуки (обертоны, гармоники) с частотами 880 Гц, 1320 Гц и т.д. Только амплитуда этих дополнительных (высших) гармоник будет убывать с ростом частоты, хотя и не равномерно. Соотношение амплитуд высших гармоник и некрatных основному звуку обертонов (дополнительных звуков) музыкального звука определяет его тембр звучания. Именно по тембру мы можем отличить зву-



чание рояля от звучания тромбона и наоборот, до бесконечности. Например, мы можем взять на рояле ноту *до* 1-й октавы, сыграть ее же на скрипке, пропеть мужским голосом на звук «а» или «э», пропеть женским голосом на звук «и» или «ы». Мы безошибочно определим, какой инструмент мы слышим, какой звук нашей речи пропеваает мужчина или женщина. Чем отличаются эти звуки? Ведь все они музыкальные и соответствуют одной ноте — *до* 1-й октавы. Они отличаются именно тембром, соотношением амплитуд гармоник и обертонов. Впрочем, понятие тембра настолько важно в музыке, что мы о нем еще не один раз поговорим.

Если дополнительные звуки основного, базового звука не являются кратными ему по частоте и/или если базового звука нет вообще, тогда эти дополнительные звуки называются обертонами. В этом случае, как правило, получается не-музыкальный звук. Его невозможно напеть или сыграть на музыкальном инструменте. Как удар палочкой по барабану. Обертоны — это более широкое понятие, чем гармоники. Гармоники лишь частный случай обертонов. Гармоники — это обертоны основного тона, кратные ему по частоте (отношение частот $2/1$, $3/1$ и т.д.).

Гармоники и обертоны струны очень сложно увидеть, для этого нужно иметь острый взор и гитару. Но можно увидеть многочисленные гармоники, обертоны, волны на поверхности мембраны барабана.



Устойчивые моды колебаний мембраны барабана.

Рисунок взят из книги «Музыка: Взгляд с точки зрения математики» Дейва Бенсона («Music: A Mathematical Offering» Dave Benson.)

На этом рисунке представлены устойчивые колебания и симметричные фигуры. Интересно, что на мембране барабана образуются и пентасимметричные узоры в форме пятиконечной звезды. Этот вид симметрии достаточно редко встречается. На него обращает внимание и крупный ученый нашего времени, физик, биолог, генетик С.В. Петухов. Некоторые из его идей, касающихся музыкального строя, основанного на генетическом коде, можно найти ниже. Кстати, в той же книге Дейв Бенсон приводит рисунки фигур, которые получаются на мелком песке, насыпанном на металлические пластины разной формы, если по краю этих пластин провести смычком. Образуются удивительные узоры, обладающие различными симметриями. Можно предположить, что такие же «узоры» образуются и в теле человека, на которого воздействуют звуки различной частоты, музыка. Кроме очевидных резонансов с отдельными органами человеческого организма, этот подход интересен еще и тем, что дает возможность предсказать воздействие звуков и на более мелкие структуры человеческого тела. Дело в том, что многие системы человеческого тела (кровеносная, лимфатическая, нервная и др.) обладают свойством фрактальности, или самоподобия. Приблизительно это напоминает структуру дерева, не зря такие структуры называются вегетативными. Так вот, резонируя с какой-то частью системы человека, звук, из-за самоподобия этих систем, может воздействовать и на остальные части тела.

Вернемся к физике и математике.

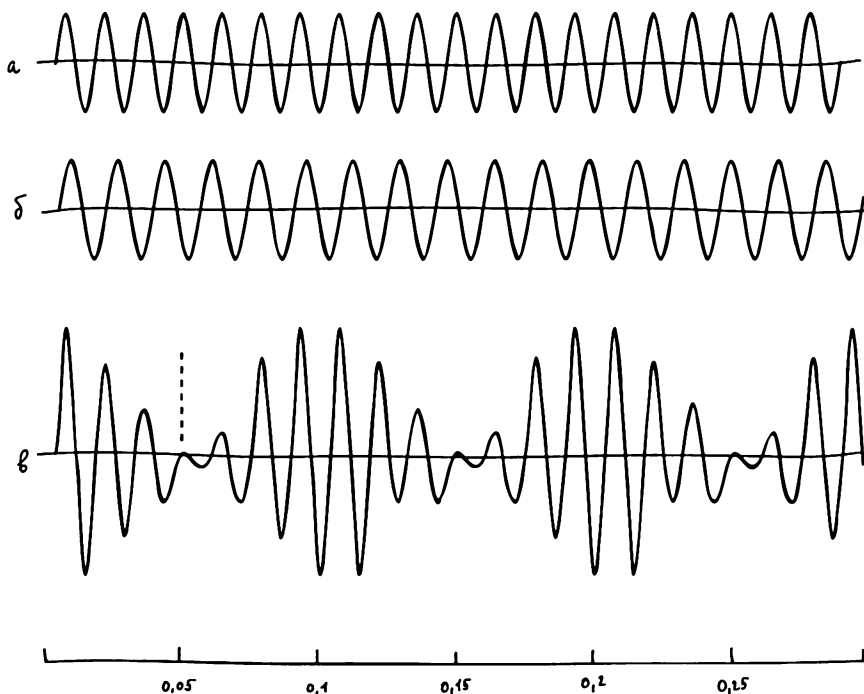
Любой сигнал, периодический или непериодический, любой звук, музыкальный или не-музыкальный, можно представить в виде суммы колебаний (звуков) различной частоты и амплитуды. Это очень важное утверждение, его нужно запомнить.

Я не случайно акцентировал внимание на том, что сложные звуки можно представить в виде суммы более простых звуков (волн) с определенными частотами, в виде суммы звука основной, базовой частоты и обертонов. Такое представление еще называется спектральным разложением звука (сигнала). Это гораздо проще и наглядней воспринимать визуально.

Добавлю немного теории, это полезно.

Давайте рассмотрим процесс сложения звуковых колебаний (одновременного звучания двух звуков разной частоты, разной высоты), для чего нарисуем простой рисунок.

Из рисунка видно, что результирующая (сумма) сложения двух волн с близкими частотами (70 Гц и 60 Гц) — кривая (в) выглядит довольно сложным образом. Есть волна с высокой частотой (между 70 и 60 Гц), но при этом амплитуда кривой сама меняется с некой другой частотой, гораздо меньшей, чем частоты основных звуков. Нетрудно догадаться, что частота изменения огибающей суммарной кривой равна 10 Гц (70 Гц – 60 Гц). На слух это звучит как биения. Звук становится



(a) Звук частотой 70 Гц

(б) Звук частотой 60 Гц

(в) Результирующая звуковая волна, являющаяся суммой волн (a) и (б)

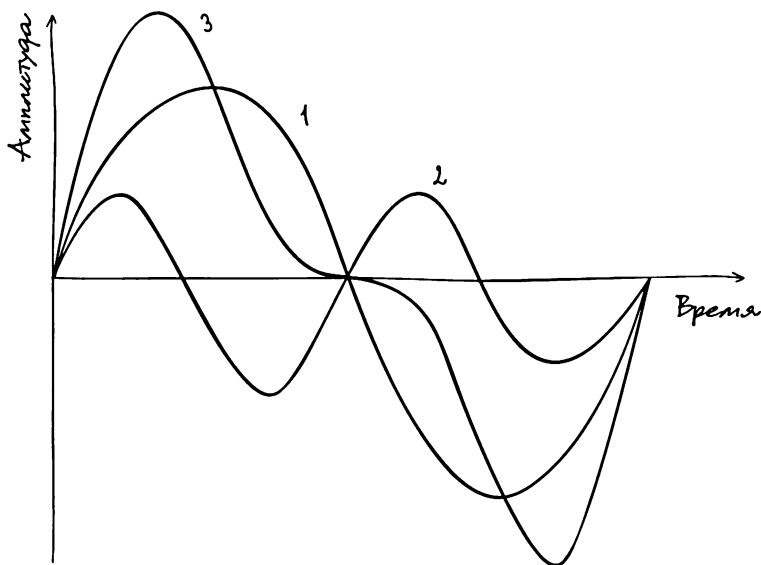
то тише, то громче. Многие, кто сами настраивали рояль или гитару либо присутствовали при этом, могут вспомнить, что эти самые биения хорошо слышны, когда настройщик подтягивает струну к одинаковому звучанию с другой струной, но не совсем еще подтянул.

Более того, нужно сказать, что при современной схеме настройки роялей (и других инструментов) принципиально невозможно настроить инструмент так, чтобы не было биений. Если инструмент настроить «чисто», без биений, то равномерный строй, современный музыкальный звукоряд просто не получится. Но многие музыканты и композиторы не боятся биений, а считают их элементом музыкальной выразительности.

Посмотрим еще на один рисунок.

Результат сложения волн (1) и (2), частоты которых отличаются в 2 раза, — это кривая (3).

Если кривая (в) на верхнем рисунке еще как-то похожа на синусоиду (на чистый звук, звук одной, выделенной частоты), то кривая (3)



на данном рисунке уже совсем не похожа на синусоиду. Единственное, что можно про нее сказать, — она имеет определенную периодичность.

Даже если есть источник звука определенной, единственной частоты, нам все равно не удастся услышать его как чистую синусоиду. В результате рассеивания (дифракции), преломления на неоднородностях среды и сложения (интерференции) волн на выходе получается весьма сложный колебательный процесс, звук с «плавающей» частотой и амплитудой.

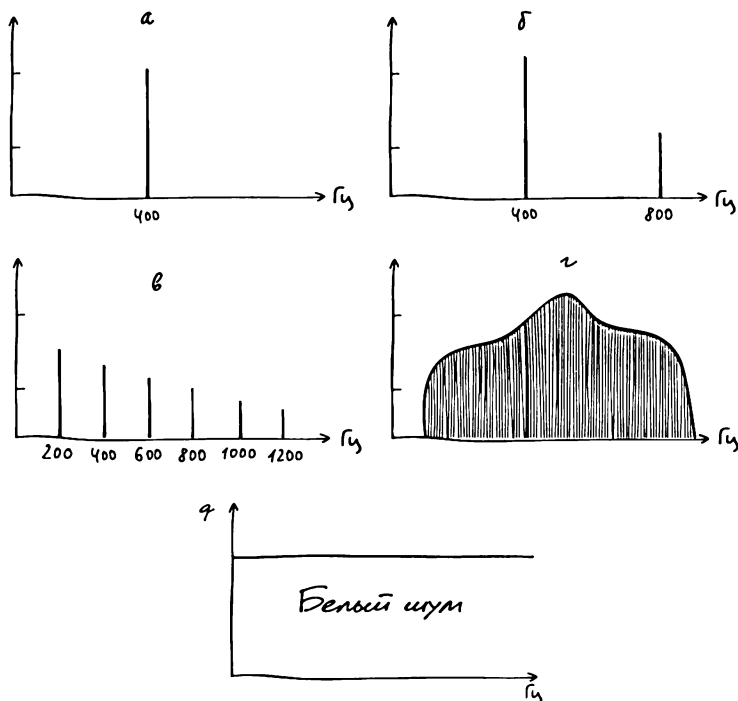
Вы уже могли заметить, что рассматривать результирующие, суммарные кривые типа кривых (в) и (3) негуманно, да и практически невозможно. Сложно уследить за всеми изгибами этих кривых и понять, что к чему. А физики и математики любят, чтобы было все понятно и просто. Как же они решили эту проблему?

Был такой гениальный человек, физик, математик, мужчина Фурье. В свое время он создал теорему, имеющую колоссальное значение для всей современной технической цивилизации. Одно лишь то, что практически все аудио- и видеоформаты записи информации прямо или косвенно используют «прямое и обратное разложение в ряд Фурье», позволяет внести его теорему в число выдающихся достижений человеческой мысли.

Так вот, согласно теореме Фурье, любой сигнал можно представить в виде суммы гармонических колебаний (синусоид) с различными величинами амплитуд, частот и фаз. При этом периодические сигналы (например — музыкальные звуки) можно разложить в сумму синусоид с кратными частотами, а непериодические (например — хлопок дверью или звук от удара ноги в челюсть) можно разложить в сумму колебаний с некратными, непериодическими частотами. Эти частоты называют

еще гармониками и/или обертонами (напомним, что гармониками называют только те обертоны, частоты которых кратны основной частоте).

Представление сложного периодического сигнала (например — звука скрипки или органа) в виде суммы простых колебаний (синусоид) называется спектральным разложением. Обычно спектр звука представляют в виде диаграммы, где по горизонтали откладывают частоту звука, а по вертикали — его амплитуду.



На рисунке (а) изображен спектр монохромного (только одной частоты) звукового сигнала, соответствующего иде-то ноте со 1-й октавы.

На рисунке (б) — спектр сигнала, состоящего из звука частотой 400 Гц и еще одного звука частотой 800 Гц, и амплитудой этого сигнала, в 2 раза меньшей, чем амплитуда первого сигнала.

На рисунке (в) — спектр сложного периодического сигнала, содержащего много кратных гармоник.

На рисунке (г) условно изображен спектр шума. Шум состоит из множества синусоид различной частоты. Как правило, у шума есть нижний предел частот и верхний предел. То есть можно говорить о некоем «частотном диапазоне» шума или сигнала.

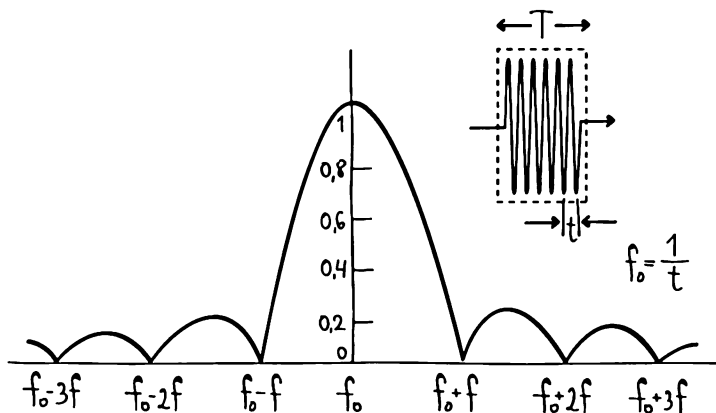
На рисунке (д) изображен спектр «белого шума». «Белым» он называется потому, что он совсем не окрашен. Амплитуды всех частот спектра «белого шума» одинаковы, «белый шум» включает в себя звуки всех возможных частот с одинаковыми амплитудами.

«Белый шум» очень любят разведчики, криптографы и прочие аналогичные им деятели. Дело в том, что «белый шум» не содержит никакой информации, следовательно — его нельзя расшифровать. Звук, чей спектр отражен на рисунке (а), содержит только одну частоту 0,4 кГц. Такой звук совершенно «не окрашен», создать его можно только с помощью генератора частот, в природе таких звуков нет. На слух он звучит «бледно», «плоско», неприятно. Когда мы добавляем к звуку частотой 0,4 кГц дополнительные гармоники частотой 0,8 кГц, 1,2 кГц и т.д. (рисунки (б) и (в)), звук начинает окрашиваться и приобретает свой уникальный тембр. При этом он остается музыкальным звуком, и наше ухо его трактует как тот же звук с частотой 400 Гц, только «окрашенный». Звук на рисунке (г) не-музыкальный, в нем нет выделенных кратных гармоник, ухо не может уловить какую-то определенную частоту звука, ноту и «окрасить» ее каким-то тембром звучания. Такой звук воспринимается как шум. Например — шум чайника или самовара, перед тем как закипит вода. Вследствие явления кавитации мы слышим шум схлопывающихся в воде пузырьков водяного пара, которые оторвались от перегретого дна чайника. Пузырьки все разные, и звук они дают разной частоты. Но все звуки лежат в определенной полосе частот, и воспринимаются как шум, а не как музыкальный звук. «Белый шум» на слух мало отличается от других шумов; отличается, конечно, но людей, которые могут его отличить, мало. Наше ухо слышит звуки в диапазоне примерно 20 Гц — 20 кГц, и эта особенность все равно «обрезает» бесконечный по частотам «белый шум», и мы слышим только часть его. Практически чистый «белый шум» создает мощный водопад, если слушать его с близкого расстояния. Если же между нами и водопадом есть какая-то преграда, например лес, то звук водопада изменяется. Такой шум называют «розовым». В «розовом шуме» отсутствуют или сильно ослаблены амплитуды частот высоких звуков. Звуки высокой частоты просто рассеиваются на деревьях и листьях.

Еще раз. Кривые звуковых волн на рисунках достаточно сложны для восприятия. Волна звука с несколькими наложенными частотами имеет сложную форму, и непонятно, что делать с такими рисунками. Последние же приведенные рисунки достаточно просты, вместо нескольких сложных синусоид мы видим всего лишь несколько палочек на рисунке, палочки отражают амплитуду звуковой волны, синусоиды определенной частоты. То есть мы видим спектральное разложение сложного сигнала, сложного звука. Такое представление гораздо проще воспринимается, оно более наглядно. И что особенно важно — на этом же принципе спектрального разложения сигнала построен принцип работы слухового аппарата человека. Иными словами, слуховой аппарат человека (и некоторых животных) представляет собой мощнейший и один из самых совершенных спектральных анализаторов звука. Впрочем, подробнее об устройстве органов слуха поговорим чуть позже.

Итак, любой сигнал можно представить в виде спектра, суммы синусоид с разными амплитудами, в виде суммы составляющих его гармоник и обертонов.

Посмотрим теперь на рисунок (спектр) сигнала с частотой f_0 , но имеющего начало и конец, то есть такого сигнала, который не является непрерывным. Кто ничего не поймет из следующего рисунка — не пугайтесь, это нормально. Кто поймет — радуйтесь тому, что вы очень умный и хорошо учили в школе физику и математику.



На этом рисунке спектр неперiodического сигнала, имеющего начало и конец, с несущей частотой f_0 , имеет яркий максимум на частоте f_0 . Но он также имеет и другие максимумы на других частотах, отличающихся от частоты f_0 на частоту f , которая равна $1/T$.

Некоторым следствием этого представления является то, что если такой сигнал (а таких сигналов большинство в природе) воспроизвести через музыкальное устройство (усилитель и колонки), то мы не услышим изначальный сигнал. Звуковоспроизводящие колонки и усилитель имеют определенную полосу пропускания звуков. Например — от 30 Гц до 20 кГц. Но спектр-то данного сигнала бесконечен вправо и влево по оси частот (с учетом того, что звуков с отрицательными частотами не существует).

Так вот, даже если частота f_0 (пиццикато скрипача) попадает в диапазон воспроизводимых колонками частот (30 Гц—20 кГц), то мы все равно услышим сигнал (звук) с искажениями, так как рано или поздно частота $f_0 + Nf$ (где N — любое целое число) окажется выше предельной пропускающей частоты колонки. Это очень важное заключение. Отсюда следует, что абсолютно любые звуки слышимого диапазона, даже не состоящие из множества собственных обертонов и гармоник, заведомо воспроизводятся на любой аппаратуре с искажениями. Можно лишь говорить о степени этих искажений. И задуматься наконец, что музыку нужно слушать «живьем», а не в записи.

1.5. ГАРМОНИЧЕСКИЕ РЯДЫ. СЛОЖНЫЙ И ПРОСТОЙ ТОН

Часть первая

Физика

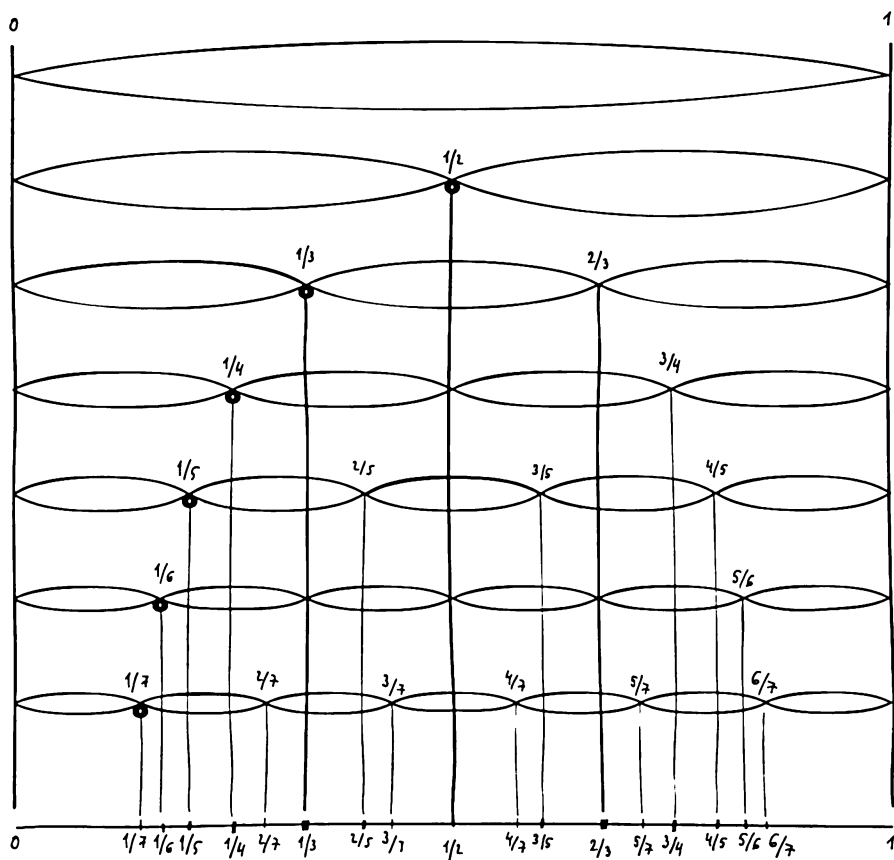
Гармонические
ряды.
Сложный
и простой тон

Многие исторические личности, музыканты, математики или философы, уделяли большое внимание тому, как колеблется свободная струна. Или просто любая веревка, натянутая между двумя кольцами. Все струнные музыкальные инструменты используют звук колеблющейся струны, усиливая и изменяя его тембр с помощью резонаторов и/или различных способов звукоизвлечения. Но сначала рассмотрим подробнее гармоники и обертоны свободно звучащей струны. Это поможет в понимании базовых концепций музыкальной гармонии. Как ни пафосно это звучит, так оно и есть.

Я нарисовал гениальный рисунок, иллюстрирующий то, как колеблется струна.

Верхняя полуволна на рисунке называется 1-й гармоникой, она определяет слышимую высоту музыкального тона. Вторая кривая (две полуволны) называется 2-й гармоникой и т.д.

Соотношение амплитуд гармоник определяет тембр звука.





Мы знаем, что если хорошенько дернуть струну, она начнет колебаться. Причем колебаться сложным образом — ее колебания будут являться суммой более простых колебаний с определенными, заданными частотами и амплитудами. При этом при затухании звука соотношение амплитуд волн разных частот (а значит, и тембр звука) будет меняться.

Так вот, если длина струны L , то первое, самое сильное колебание (определяющее высоту основного тона звучащей струны) имеет такую длину волны, что половина длины волны равна L . Звуки в струне будут рождаться такие, чтобы колебания струны, которые им соответствуют, имели минимумы амплитуды, строго говоря — амплитуду, равную нулю («узлы») на концах струны, которые жестко закреплены и не могут колебаться. (Высоту звука, производимого струной, определяет не только его длина, а еще и натяжение струны, которое влияет на упругие свойства струны и, как следствие, на скорость распространения поперечной волны по струне¹.) Кроме волны, имеющей «пучность» посредине струны (1-я гармоника), мы можем наблюдать еще волны других типов, у которых в длину струны L укладывается не половина волны, а две полуволны, три полуволны и т.д. (гармоники 2-я, 3-я и т.д.). Наблюдая за звучащей гитарной басовой струной или басовой струной рояля, можно заметить на ней, если внимательно присмотреться, такие же волны, «узлы» (минимумы амплитуды колебаний различных волн) и «пучности» (максимумы амплитуды колебаний), как и на последнем рисунке. Амплитуды звуков высших гармоник (гармоник 2, 3 и т.д.) будут меньше, чем амплитуда основного тона (1-й гармоники, основной частоты). Соотношение амплитуд гармоник реальной струны будет определяться свойствами струны и музыкального инструмента, резонаторов инструмента (гитара, скрипка и пр.) и способом извлечения звука (где, как сильно и чем дернули за струну)².

Собственно говоря, гармоники — это всего лишь устойчивые обертоны струны. Простое спектральное разложение полного, суммарного звука, исходящего от натянутой струны.

Например, любой гитарист знает, что из басовой струны легко получить ясно звучащий обертон, гармонику, если использовать «флажо-

¹ Конечно, в жизни все сложнее. Реальные струны имеют определенную толщину, материал, из которого изготавливают струны, имеет свой предел прочности и коэффициенты упругости. То место, где струна крепится к колкам музыкального инструмента, не может колебаться так, как мы показали на идеальных, математически точных рисунках с гармониками струн. Вблизи мест крепления струн они вообще могут с трудом колебаться. Эти особенности реальной струны уменьшают эффективную длину волны струны и влияют на тембр, то есть на соотношение амплитуд гармоник струны, так как поперечным волнам высокой частоты очень тяжело колебаться на толстом, жестком, неподвижном цилиндре, который представляет из себя струна вблизи точки крепления. Подробно эти особенности реальных струн (наряду с реальными флейтами) описаны в замечательной книге Криса Форстера «Музыкальная математика» («Musical Mathematics» Cris Forster) и в книге Дейва Бенсона «Музыка: Взгляд с точки зрения математики» («Music: A Mathematical Offering» Dave Benson). К сожалению, пока обе эти книги доступны только на английском языке.

These features of real strings (along with real flutes) are described in detail in the excellent book "Musical Mathematics" by Cris Forster...

² Если говорить языком математики, то решение уравнения колебательного движения струны будет определяться начальными условиями: первоначальными значениями координат и скорости каждого кусочка струны.

лет». То есть слегка прижать «пучности» струны в определенной точке, погасив таким образом колебания 1-й или 2-й гармоники.

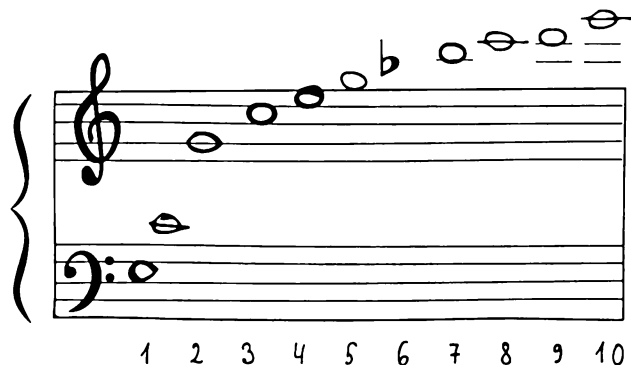
Но раз уж мы рассуждаем тут не о физике, а скорее о музыке, нужно более внимательно рассмотреть понятие гармонического ряда и тембра музыкального звука. Как уже говорилось, соотношение гармоник, обертонов основного тона определяет тембр, интонацию звука.

Более 100 лет назад известный композитор С.М. Майкопар писал в своей книге «Музыкальный слух», что без гармонических рядов, без тембра вообще не существовало бы всей музыкальной системы.

Часто тембральную окраску звуков сравнивают с радугой. Но, смотря на белый цвет, мы не подозреваем о том, что он состоит из множества цветов радуги. Так же и слыша какой-то звук, мы не можем с ходу определить, из совокупности скольких звуков, гармоник, обертонов он состоит. Мы можем слышать тембр звука, его окраску, интонацию. То есть тембр звука, музыкального инструмента или голоса человека у нас ассоциируется с неким устойчивым образом. Для музыкантов тембр звука имеет одно из самых важных значений.

Если ударить молоточком, скажем, по басовой струне *до* старого немецкого рояля, то родится не только звук *до* басового диапазона, а еще и звуки, длины волн которых «укладываются» целое количество раз в этой струне. Эти дополнительные звуки, гармоники, принято нумеровать. Номер гармоники звука отражает число колебаний каждого гармонического тона, приходящееся на одно колебание основного тона. Длины волн гармоник, дополнительных колебаний, обертонов будут соотноситься как $1/2$, $1/3$, $1/4$ и т.д. Соответственно, частоты гармоник относятся к частоте основного тона как $2/1$, $3/1$, $4/1$ и т.д.

Гармоники ноты *до* басовой октавы (1-я гармоника) выглядят так: *до* малой октавы (2-я), *соль* малой октавы (3-я), *до* 1-й октавы (4-я), *ми* 1-й октавы (5-я) и т.д. При этом соответствие гармоник нотам рояля несколько условное, так как равномерно темперированный строй рояля лишь примерно соответствует различным, так называемым чистым, натуральным строям, к которым относится и настройка «по гармоникам».



То есть когда нам кажется, что мы слышим какую-либо ноту, взятую на рояле, гитаре и на любом ином инструменте, на самом деле мы слышим кроме основного тона звука, задающего высоту, еще и множество обертонов, гармоник, определяющих тембр звука.

Интерес также представляет вопрос, не имеющий прямого отношения к музыке: а как же вообще может одна струна одновременно издавать несколько звуков? Поверим физикам — она может и не такое. Достаточно очевидным является замечание, что, в силу различных физических параметров, колебания струны с разными частотами, гармоники свободно звучащей струны будут затухать по-разному. И тембр (соотношение гармоник струны) будет меняться во времени. Так что звук *до* сразу после взятия его на рояле и спустя 5 секунд будут отличаться. И человек с «правильным ухом» легко может это заметить.

Теперь — что касается «простых» и «сложных» тонов. «Простой», «чистый» тон — звук одной частоты, который можно издать лишь с помощью генератора частот. В природе таких звуков не существует. В природе и в музыке существуют только «сложные» тоны, состоящие из основного тона (если он вообще есть) и множества дополнительных гармоник, обертонов.

Многие люди считают, что есть «приятные» сочетания звуков, а есть «неприятные». Говоря об интервалах звуков, аккордах, их еще называют консонансными (благозвучными) и диссонансными (неблагозвучными). И вот выяснили, что благозвучными являются сочетания звуков, частоты которых соотносятся как небольшие целые числа. В каком-то смысле это понятно.

Вот и в звуке одной струны очень даже благозвучно сочетаются как основной тон, так и все гармоники струны, а именно — звуки с удвоенной, утроенной, учетверенной и т.д. частотами основного тона. Ведь к звуку-то одной струны у нас претензий вроде бы нет?! Нет! Потому и хочется сделать из этих гармонично сочетающихся звуков (гармоник) нечто такое, с помощью чего можно было бы играть на балалайке или ситаре песенки и петь каноны в церкви.

Принципы построения звукорядов, музыкальных строев на основе гармоник свободно звучащей струны я рассмотрю позже. Это отдельный, очень интересный вопрос.

Поговорим теперь о тембре.

1.6. ЗВУКОВАЯ КРАСКА. ТЕМБР

Удивительно, но понятию «тембр» в различных книгах по музыке придается относительно малое значение. Чаще всего говорится о высоте ноты, ее громкости или длительности. Это представляется странным. Пожалуй, только тот же, упоминавшийся ранее, композитор С.М. Май-



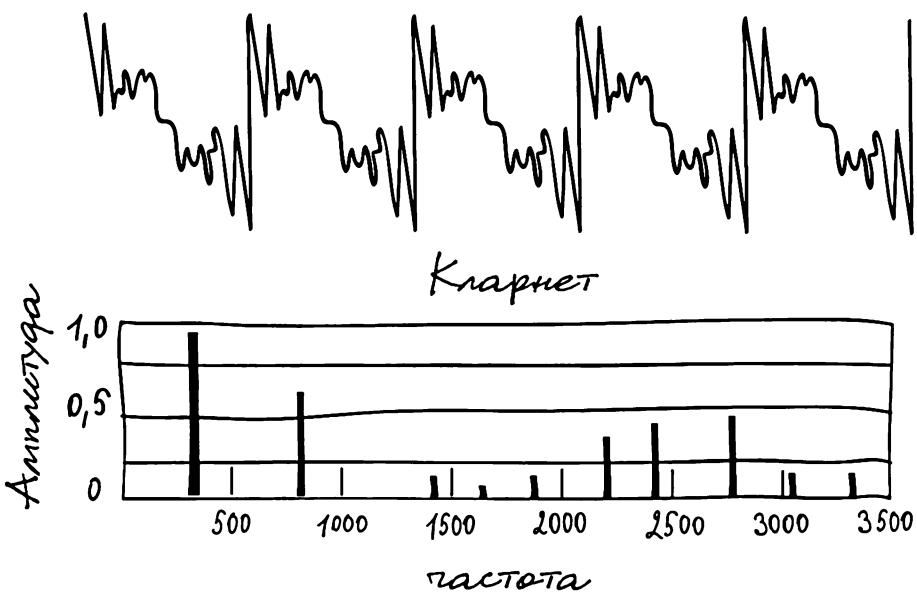
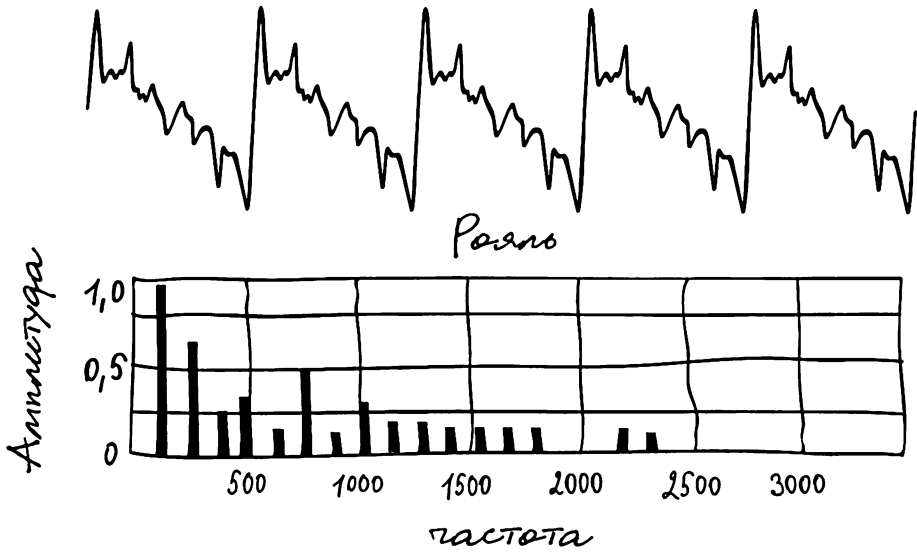
копар в книге «Музыкальный слух» уделил этому понятию достойное внимание.

Если сравнивать звук и цвет, то тембр звука подобен цветовому отличию разных мазков на картине художника. Ведь нам совсем не все равно, какими красками будут нарисованы солнце, трава и небо. Совсем не все равно. Живопись нельзя свести к графическому изображению предметов. Иногда это бывает интересным, но лишь в редких случаях. Музыка, воспроизводимая без участия тембральной окраски звуков, на слух очень неприятна. Она похожа на звучание дешевых синтезаторов и детских звучащих книжек, которые, по мнению производителей, должны развивать слух у ребенка, а по сути — губят его.

Самое часто встречающееся определение того, что означает тембр, примерно такое: «Тембр — это то, чем отличается звук скрипки от звука рояля». Ну... Тембром они, конечно, тоже различаются. Однако при этом тембр каждой из струн рояля отличается, так же как и на скрипке одну и ту же ноту можно взять тысячью разных способов с различным тембром образующихся звуков. Многие знают, что звуки, извлекаемые из скрипки молодым музыкантом (а именно — тембральная окраска, интонация звука), совершенно невыносимы. И вообще молодые люди часто совершенно невыносимы.

Что же такое тембр? В XIX веке, когда еще не было компьютерных спектральных анализаторов звука, легко раскладывающих сложный звук на гармоники, акустический гуру Гельмгольц удивительно точно сформулировал основную идею: «Тембр звука характеризуется формой колебаний». А ведь и правда! Звуковая волна, состоящая из одной гармоники, имеет форму синусоиды. Из двух — сложнее, из трех — еще сложнее. С точки зрения учения о гармонических рядах (и рядах Фурье), тембр звуков отличается различными сочетаниями гармоник и обертонов, их частот и амплитуд. Это сочетание может быть бесконечно разнообразным.

Если на следующем рисунке (см. с. 38) мы посмотрим на форму волны звука рояля и звука кларнета, на кривые звукового давления (эти кривые находятся над амплитудно-частотными характеристиками), то мы заметим, что кривые отличаются. Но при этом кривые совершенно неинформативны! Периодический сигнал, слегка похожий на синусоиду, весь покрыт какими-то зазубринами, большими и маленькими впадинками, понять, что к чему, совершенно невозможно. Другое дело — спектральное разложение этих звуков, амплитудно-частотная характеристика. Видно, что амплитуда высших гармоник рояля более-менее плавно убывает с ростом частоты. И этих гармоник, обертонов довольно много. Спектр кларнета же гораздо менее богат на обертоны и гармоники. В области 2500 Гц — 3000 Гц обертоны образуют даже некую группу. Такие группы часто называют формантами или формантными группами. Тоже, конечно, непростые графики, но уж точно лучше, чем кривая давления звука рояля и кларнета.



На рисунке показаны кривые звука (звукового давления) рояля и кларнета, а также их спектральное разложение (разложение в ряд Фурье)

В природе не существует «простых», «чистых» звуков, тембрально не окрашенных. Наиболее «чистым», почти без примеси гармоник, по-видимому, является звук камертона. Форма его звука близка к синусоиде.

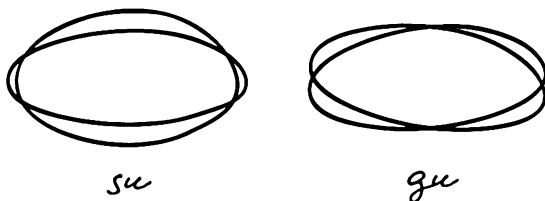
Соотношение частот и амплитуд гармоник музыкального инструмента определяется его устройством и, в принципе, может быть бес-

конечно разнообразным. У некоторых типов инструментов есть общие особенности. В звуках кларнета и других закрытых духовых инструментов отсутствуют четные гармоники основного звука. Просто в силу устройства инструмента. В звуках русских колоколов присутствует много некротных основному тону обертонов, поэтому звук колокола сложно напеть.

Если в звуке много гармоник, то он выглядит «богатым». Но если в нем слишком много дополнительных гармоник и обертонов, он выглядит «грязным», а если много верхних гармоник — резким, крикливым, неприятным.

Ну и, заканчивая говорить о тембре, нужно сделать еще два замечания. Первое касается того, что человеческое ухо не может слышать звуки выше некоторой граничной частоты, около 16–20 кГц. А частоты гармоник одной ноты отличаются от первой гармоники в 2, 3, 4 и более раз, практически до бесконечности. То есть начиная с какой-то гармоники человеческое ухо просто не слышит этот звук, его частоту. А чем больше человек слышит гармоник звука, тем более «богатым» и «интересным» ему кажется звук. Нетрудно догадаться, что наибольшее количество гармоник (самый «богатый» звук) мы сможем услышать у низких звуков. На рояле — у нот в басовом диапазоне. Верхние ноты на рояле звучат «бедненько», «плоско», «одинаково» по тембру. Но они не виноваты. Виноваты наши уши. Впрочем, они не очень-то и виноваты. Виновата природа. Да и она, по большому счету, ни в чем не виновата. Просто так все устроено.

Второе замечание, которое нужно сделать, касается того, что обертоны, определяющие тембр звука какого-либо музыкального инструмента, вовсе не должны быть кратными основному тону звука. Они могут иметь произвольную частоту. Это может определяться формой звучащего объекта (например — колокола, квадратной металлической пластинки), формой резонатора (скрипки или лютни) и многими другими факторами. Некоторые инструменты специально изготавливали так, чтобы можно было услышать два ярких максимума звука, два ярко выраженных некротных обертона. Например, так конструировали в древности двухтоновые китайские колокола. Рисунок колебательных мод двухтоновых колоколов вы можете видеть на рисунке. Китайцы выделяли в звуке такого колокола два тона — *su* и *gu*, соответствующие двум базовым устойчивым модам колебания колокола.



Тембр: как мы его различаем?

Нестационарные фазы звука. Форманты

О чем этот раздел? Вроде бы уже поговорили о тембре звука, зачем еще что-то говорить? Однако меня часто интересовал вопрос: как человек может выделить и опознать тембр музыкального инструмента, даже если он плохо различим на фоне помех, как можно узнать голос человека (тембр его голоса) по телефону, когда голос или звук инструмента прошел последовательно через плохие микрофоны, плохие провода и плохие динамики? Как человек может выделять голос своей любимой собаки, голос своего нелюбимого начальника на фоне общего шума и гама?

Долгое время, на протяжении 100–150 лет, начиная с акустического гуру Гельмгольца и до нашего времени, почти никто не подвергал сомнению тот факт, что тембр звука (голоса) определяется соотношением гармоник, на которые раскладывается звук. Говорилось все это о так называемой стационарной части звука, то есть о том периоде, когда звук уже не меняется. И вот выяснилось, что человек (почти как лягушка) слабо — или, по крайней мере, в меньшей степени — реагирует на установившиеся процессы, не очень хорошо выделяя их на фоне окружающего мира. А обращает он внимание на нестационарные, динамические параметры звука, в том числе и на тембр.

В формировании любого звука (музыкального инструмента или голоса) можно выделить три фазы: атаку (процесс нарастания звука), стационарную часть и фазу спада звука. В различных инструментах, у человека и животных, в зависимости от используемых у них способов звукообразования, временные интервалы этих фаз разные. У ударных и щипковых инструментов, например гитары, мы слышим короткий отрезок времени атаки и стационарной фазы и длинный — фазы затухания. В звуке органной трубы достаточно длинный отрезок стационарной фазы и короткий период затухания. Оказалось, что для быстрого опознания тембра инструмента или голоса человек больше внимания уделяет нестационарным фазам звучания: атаке и фазе затухания звука.

Флейта использует в качестве резонатора открытую с двух концов трубу, поэтому содержит в спектре все четные и нечетные гармоники. При этом уровень (амплитуда) гармоник быстро уменьшается с частотой. У кларнета в качестве резонатора используется труба, закрытая с одного конца, поэтому в спектре звука содержатся лишь нечетные гармоники. В звуке трубы мы слышим много высокочастотных гармоник. Тембры всех этих инструментов совершенно разные: у флейты — мягкий, нежный, у кларнета — матовый, глуховатый, у трубы — яркий, резкий.

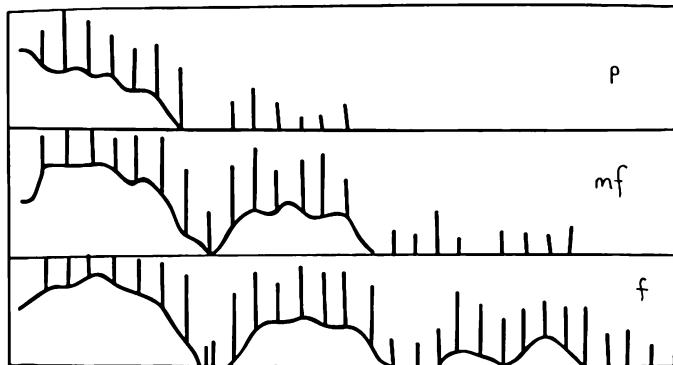
Наличие в звуке 5–7 первых гармоник с большими амплитудами делает звук полным, сочным. Большое число высокочастотных гармоник с одновременным ослаблением первых гармоник делает звук резким, скрипучим. Разнообразие тембров велико, правда, сложно их



как-то определенным и однозначно трактуемым образом называть. Вот и появляются определения-«уродцы»: малиновый, теплый, бархатистый, металлический и т.п.

Интересной особенностью гармоник и обертонов является то, что они, как правило, не равномерно распределены по частотной шкале, а стремятся образовывать группы гармоник, называемые «формантными группами». Расположение формантных областей служит главным критерием различимости звуков речи. То есть именно по формантным группам мы различаем звуки «а», «э», «и», «м» и др. Обертоны гласных звуков обычно образуют всего 2–3 формантные группы с частотами 0,5–0,6 кГц, 1,1–1,3 кГц и 2,5–2,6 кГц. Такие группы связаны со строением нашей носоглотки, резонансными полостями. Чувствительность уха в области средних частот (голосовом диапазоне) чрезвычайно высока, что и понятно, ведь речь, понимание ее нюансов и улавливание интонаций очень важны для людей. Особенно высока чувствительность уха к частотам 2,5–3 кГц. В эту область попадает верхняя формантная группа звуков нашей речи. Такая форманта называется «певческой формантой». Преподаватели пения стараются научить «закачивать» в нее максимум звуковой энергии. Получаемый при таких тренировках голос мы хорошо знаем, это так называемый оперный голос, он хорошо выделяется даже на фоне симфонического оркестра.

Тембр звучания музыки и речи изменяется в зависимости от изменения громкости и от транспонирования музыки, голоса, звуков по высоте. Во-первых, при увеличении амплитуды колебаний источников звуков различных музыкальных инструментов (струн, мембран, дек) в них начинают проявляться нелинейные эффекты, что приводит к обогащению спектра дополнительными обертонами. На рисунке показан спектр звука рояля при разной силе удара по струне (piano, m. forte, forte), кроме выделенных обертонов на рисунке видно и шумовую часть спектра.

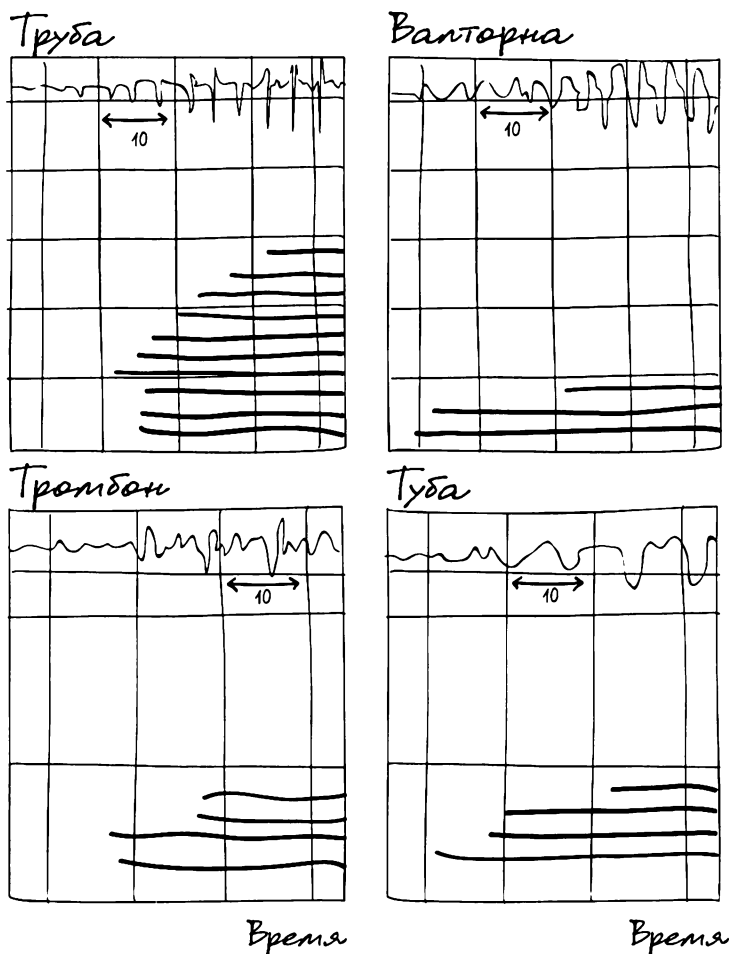


*Зависимость состава спектра звука рояля от силы удара по струне:
p — пиано (тихо), mf — меццо-форте (звук средней громкости),
f — форте (громко)*

Во-вторых, с увеличением уровня громкости изменяется чувствительность слуховой системы к восприятию низких и высоких частот. Поэтому при повышении громкости (до разумного предела 90–92 дБ) тембр становится полнее, богаче, чем при тихих звуках. При дальнейшем увеличении громкости начинают сказываться сильные искажения в источниках звука и слуховой системе, что приводит к ухудшению тембра.

Вернемся к нестационарным фазам звука. Процесс атаки особенно важен для распознавания тембра еще и потому, что является устойчивой характеристикой звучания данного инструмента. Устойчив он для восприятия прежде всего потому, что менее всего подвержен «окрашиванию» со стороны помещения, поскольку первые отражения поступают к слушателю с определенным запаздыванием, после того как фаза атаки уже завершена и поступила к слушателю неокрашенной в виде прямого звука. Если бы этого не было, то распознать тембр инструмен-

АТАКА ЗВУКА ДЛЯ ДУХОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ



та при исполнении в различных помещениях было бы очень сложно или невозможно. Эксперименты показали, что слушатели не могут опознать музыкальный инструмент, если фаза атаки удалена или изменена. Если поменять местами фазы атаки и спада (проиграть, например, запись любого инструмента в обратном направлении), тембр меняется до неузнаваемости.

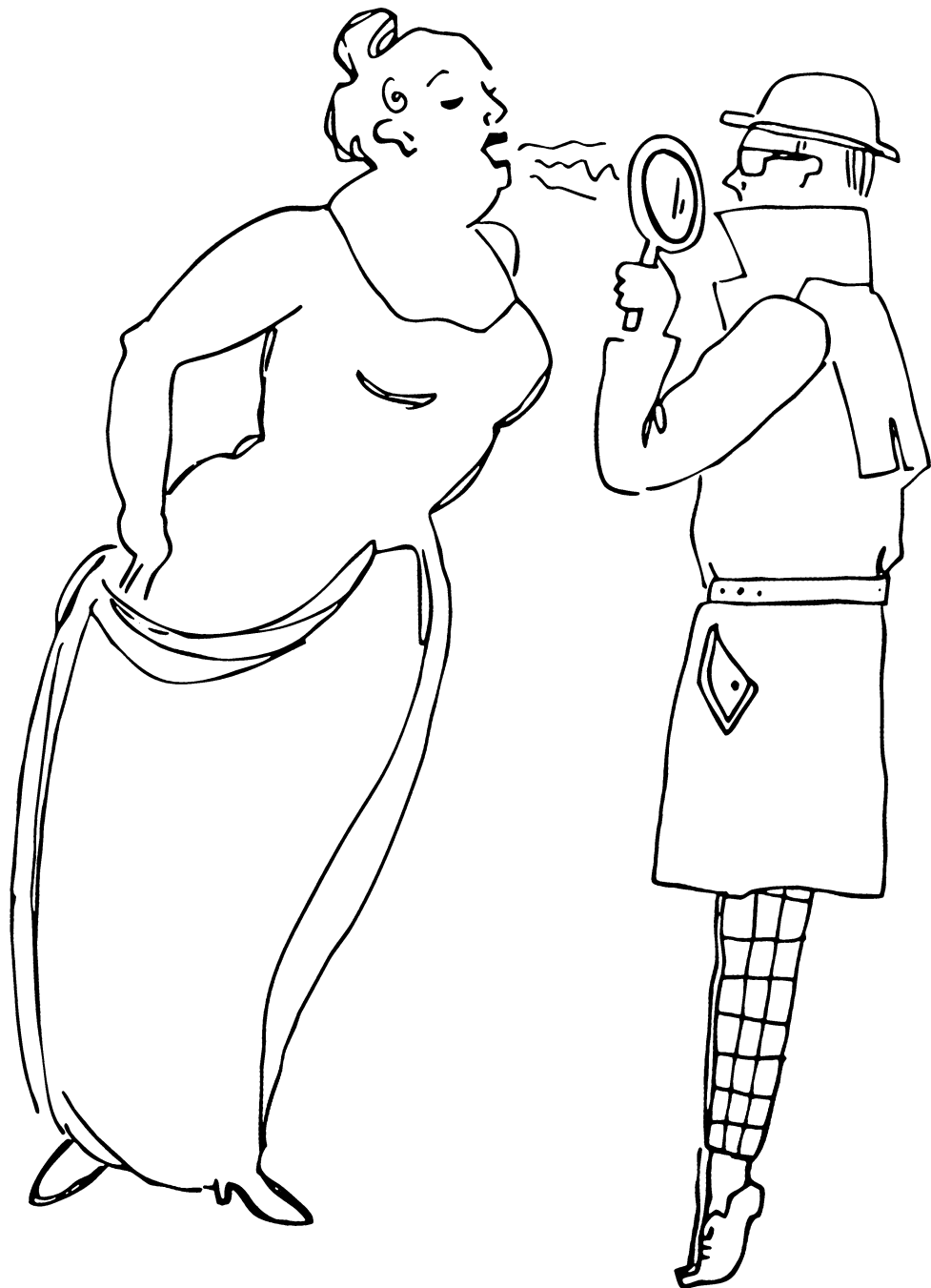
На рисунке приведены примеры зависимостей уровня звукового давления от времени и их спектрограмм (зависимостей амплитуд обертонов от времени) для начального периода установления колебаний (атаки) различных инструментов. Что это за непонятные графики? В действительности все просто. В верхних частях рисунков мы видим форму сигнала звука различных инструментов, график изменения звукового давления. Форма кривой со временем меняется, а потом становится более-менее неизменной. То есть звук музыкального инструмента отличается во время фазы атаки, нарастания звука и стационарной фазы. Ниже кривых давления звука показаны спектры звука. Если бы спектр не менялся со временем, все палки, амплитуды соответствующих гармоник и обертонов, были бы одной длины. А так они меняются со временем. При этом меняется и тембр. Такие нестационарные фазы звука, фаза нарастания и фаза затухания, очень, даже принципиально, важны для опознания по тембру какого-то музыкального инструмента или звука речи. Об этом говорят экспериментальные исследования.

Тембр и принципы распознавания слуховых образов

Современная психоакустика (наука на стыке физики, биологии и психологии) утверждает, что тембр звуков, музыкальных или не-музыкальных, лежит в основе принципов распознавания человеком звуковых образов. При этом гештальтпсихология (*gestalt*, нем. «образ») и психоакустика считают, что для разделения и распознавания звуковой информации, приходящей к нам из множества источников в одно и то же время (игра оркестра, разговор многих собеседников), наша слуховая система использует некоторые общие принципы.

Первый принцип — сегрегация. То есть слуховой аппарат разделяет общий звук на отдельные звуковые потоки, субъективно выделяя определенные группы звуковых источников. Например, при музыкальной полифонии слух может отслеживать развитие мелодий у отдельных инструментов.

Второй принцип — подобие. Звуки, похожие по тембру, группируются вместе и приписываются одному источнику. Например, звуки речи с близкой высотой и похожим тембром считаются принадлежащими одному собеседнику.



Третий принцип — непрерывность. Слуховая система может додумывать (интерполировать, экстраполировать) звук. Например, если в речь или музыку вставить короткий отрезок шума, слуховая система может не заметить его, звуковой поток будет продолжать восприниматься как непрерывный.

Еще один принцип — «общая судьба». Звуки, которые стартуют и останавливаются, изменяются по амплитуде или частоте в определенных, небольших пределах синхронно, приписываются одному источнику.

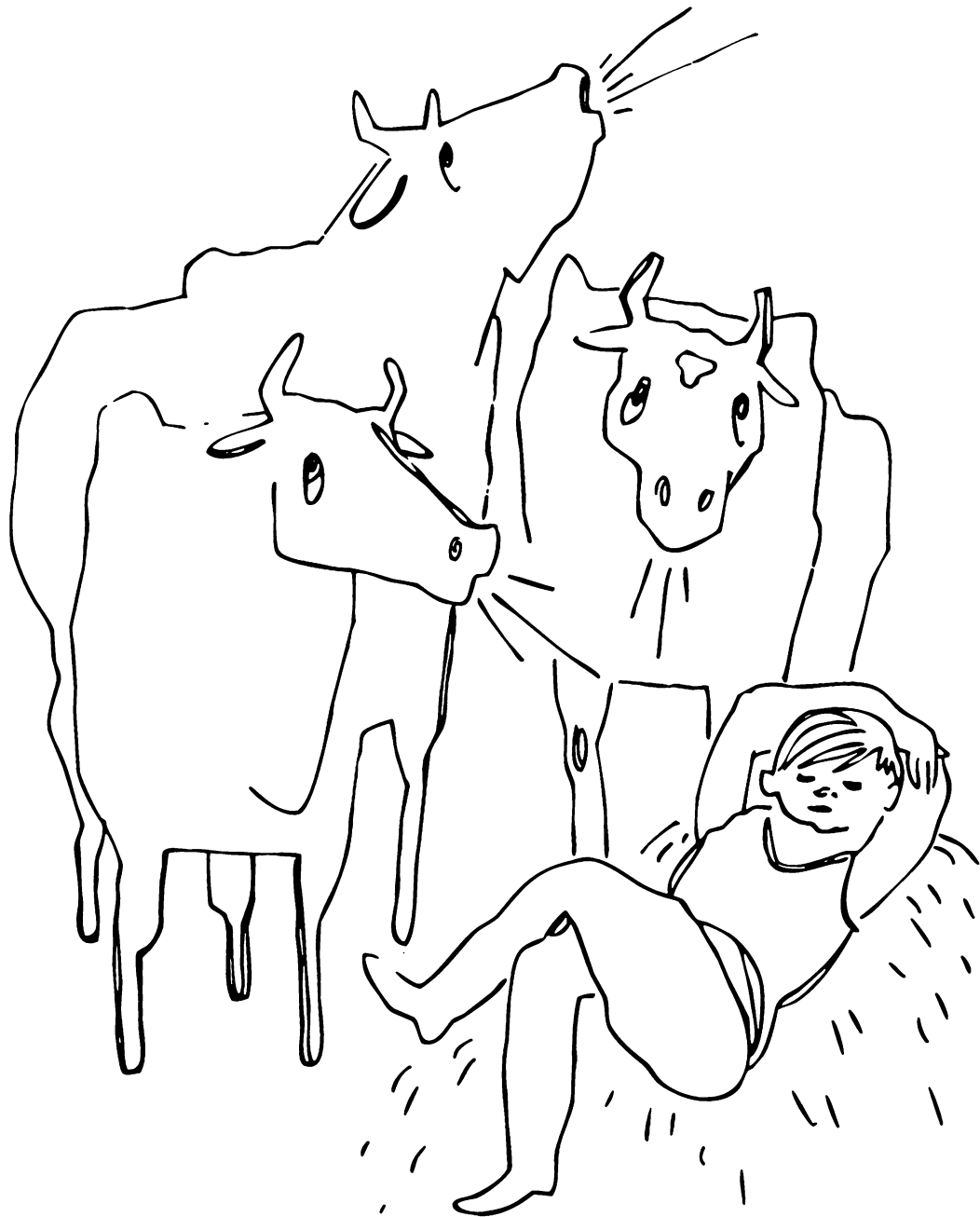
Раздел науки, рассматривающий восприятие звуковых образов (так же как и визуальных, тактильных), чрезвычайно велик. Невозможно охватить его в какой-то заметной степени. Достаточно далеко в этой области продвинулись спецслужбы различных стран, придумывая анализаторы речи, которые могли бы помочь «исследователям» определить, где человек родился, какой у него родной язык, где он изучал иностранный язык, выявить его характерологические особенности и т.д. Совместно с фонетическим и лингвистическим такой анализ может дать информацию о возрасте человека, его социальном статусе, образовании, текущем психоэмоциональном состоянии. Его можно использовать (и он используется) в рамках исследования человека на полиграфе, «детекторе лжи», он незаменим для поиска террористов и иностранных шпионов. Но, как и всякое оружие, такой анализ может быть направлен в любую сторону.

По пути исследования восприятия звуковых образов далеко продвинулись и акустики — те, кто работает над акустикой музыкальных инструментов, изучает и придумывает микрофоны, усилители, акустические системы, занимается вопросами сжатия музыкальной информации и т.д.

1.7. СВЯЗь ОБЪЕКТИВНЫХ И СУБЪЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКА. КАКИЕ ЗВУКИ МЫ ВООБЩЕ СПОСОБНЫ СЛЫШАТЬ?¹

Выше говорилось о таких характеристиках звука как интенсивность (амплитуда), частота и длительность. Казалось бы — что еще нужно? Достаточно! Но в своей обыденной практике люди в основном пользуются другими терминами, такими субъективными характеристиками звука как громкость, высота, продолжительность. Думается, что эти характеристики, физические и психофизические, являются просто синонимами. Так ведь нет! Эти понятия и характеристики, конечно, свя-

¹ Необходимость написания данного раздела заключается в том, что человек не логарифмическая линейка, не машина, не прибор. Если даже и машина — то очень хитрая (очень хитрая!) и довольно сложная машина.



заны между собой, но связаны совсем не очевидным образом. И важно, чтобы с этими понятиями была если не полная ясность, то хотя бы частичная.

Аналогом объективной (физической) характеристики звука — интенсивности является субъективная (психофизическая) характеристика — громкость. Конечно, звуки большей интенсивности воспринимаются в среднем как более громкие, однако прямой зависимости тут нет. На громкость влияют еще частота звука и его продолжительность. Ученые для измерения громкости применяют метод сравнения некоего тона определенной частоты с другим тоном той же частоты, но отличающимся от него по интенсивности¹. Общее соотношение интенсивности звуков и громкости отражено на рисунках на с. 49.

Для обозначения громкости в мире принята единица измерения «сон», которая представляет собой громкость тона частотой 1000 Гц и интенсивностью 40 дБ.

На рисунке (б) представлены кривые равной громкости. То есть каждая линия — это множество точек, соответствующих своему сочетанию частоты звука и его интенсивности, но человек все эти звуки считает звуками одной и той же громкости. Например, одинаковыми по громкости наше ухо (и носитель нашего уха) считает звук частотой 3000 Гц (верхний диапазон рояля) и интенсивностью около 0–1 дБ и звук частотой 30 Гц (нижний диапазон рояля) и интенсивностью 60 дБ. Одинаковые по громкости!!! Звуки, отличающиеся по интенсивности в миллион раз! Однако затейником был наш демиург!

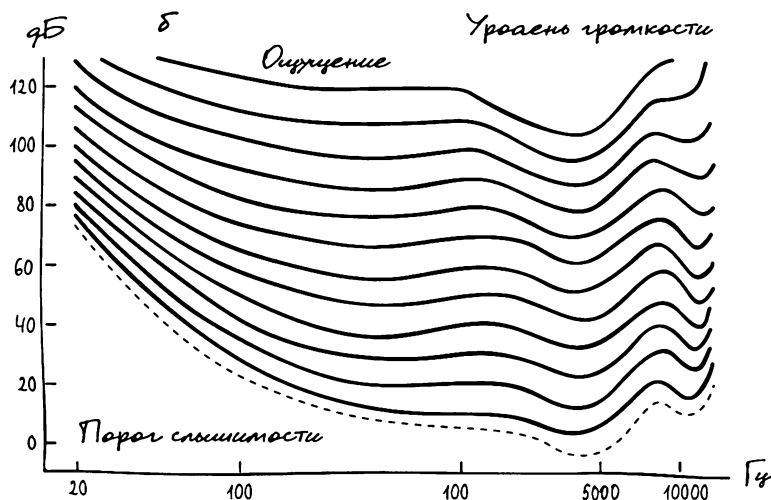
Из рисунков (а) и (б) видно, что громкость звука зависит не только от интенсивности звука, но и от его частоты. Чувствительность слуха к разным частотам также различна. Если интенсивность звука меньше, чем некая абсолютная пороговая чувствительность слуха, то звуки данной частоты человек уже не слышит. Кривая, построенная по такому принципу, называется кривой пороговой слышимости. Из рисунка (б) также видно, что если сохранять одинаковую интенсивность звука и менять его частоту (проводить горизонтальную линию), громкость звука будет меняться (линия будет пересекать различные кривые равной громкости).

Рисунок (б) довольно интересен. Первое, что можно заметить, — ниже некоего порогового значения частоты (около 20 Гц) и выше некоего порогового значения (около 20 кГц) человек звуки не слышит. Второе — чем больше интенсивность звука, тем меньше различия по громкости человек ощущает (кривая становится более горизонтальной). Заметен также яркий максимум чувствительности на 3–5 кГц (верхние средние частоты). Довольно «оригинально и непредсказуе-

¹ Считается, что громкость пропорциональна логарифму интенсивности звука, так же как почти все наши органы чувств имеют логарифмическую, а не линейную связь между интенсивностью сигнала и субъективными ощущениями.

Физика

Связь
объективных
и субъективных
характеристик
звука.
Какие звуки мы
вообще способны
слышать?

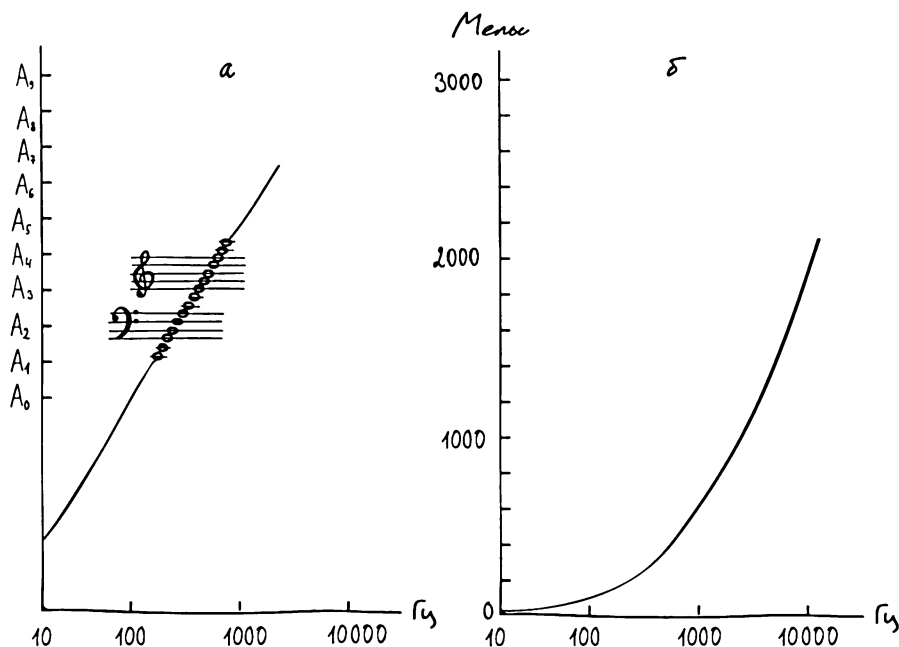


мо» ведет себя чувствительность слуха около 10 кГц. Например, звуки низкой частоты при одинаковой интенсивности со звуками речи, со звуками средних частот, будут казаться нам тихими. У нас может при этом ходить ходуном все тело из-за воздействия звуков низкой частоты непосредственно на наш организм, а слуховая система будет считать эти звуки тихими. Та же ситуация и с высокими звуками. Недавно я был на лекции-концерте прекрасного пианиста, композитора, дирижера и популяризатора Михаила Аркадьева в Еврейском культурном

центре. Так вот, в этом самом Еврейском культурном центре что-то свистело в частотном диапазоне около 13–17 кГц. Молодая часть аудитории испытывала сильнейший дискомфорт от этих очень громких звуков, звуки высокой частоты мешали слушать музыку, речь лектора. Слушатели же старшего возраста, у которых чувствительность к верхним частотам снижена, или вовсе не слышали этих звуков, или слышали, но слабо, и неодобрительно смотрели на молодых людей, которые зажимали уши и гримасничали. Однако даже самые молодые и самые здоровые слушатели не могут слышать звуки частотой выше 20 кГц, ультразвук. Громкость звуков с ростом частоты при одинаковой интенсивности будет снижаться.

Это все, что касается чувствительности слуха к громкости звуков. Теперь о восприятии высоты звука.

Ученые-акустики придумали психофизический эквивалент частоты тона. Для этого они ввели единицу измерения «мел». Тон частотой 1 кГц при 60 дБ имеет высоту 1000 мелов. Высота тона (эквивалент понятия «частота») связана с его частотной зависимостью так, как отражено на рисунке:



По горизонтали — частота тона.

По вертикали на рисунке (а) — условное обозначение музыкального звукоряда, на рисунке (б) — высота тона в меллах

Связь
объективных
и субъективных
характеристик
звука.

Какие звуки мы
вообще способны
слышать?

Какие звуки мы вообще способны слышать?

Ученые любят придумывать специальные, сложно звучащие слова для описания чего-либо. Зачем они это делают? Конечно, мы все помним диалог между «ученым» и сталкером из «Пикника на обочине» братьев Стругацких:

— И все-таки так нельзя. Я уж не говорю про ваш пикник — это вообще свинство, — но если даже принять версию, что это, скажем, прелюдия к контакту, все равно нехорошо. Я понимаю — «браслеты», «пустышки»... Но «ведьмин-то студень» зачем? «Комариные плеши», пух этот отвратительный...

— Простите, — сказал Валентин, выбирая ломтик лимона. — Я не совсем понимаю вашу терминологию. Какие, простите, плеши?

Нунан засмеялся.

— Это фольклор, — пояснил он. — Рабочий жаргон сталкеров. «Комариные плеши» — это области повышенной гравитации.

— А, гравиконцентраты... Направленная гравитация. Вот об этом я бы поговорил с удовольствием, но вы ничего не поймете.

— Почему же это я ничего не пойму? Я все-таки инженер...

— Потому что я сам не понимаю, — сказал Валентин. — У меня есть системы уравнений, но как их истолковать — я представления не имею... <...>

Лицо у него спокойное и ясное сделалось: видно, всё понял. Они ведь все, очкарики, такие. Им главное — название придумать. Пока не придумал, смотреть на него жалко, дурак дураком. Ну а как придумал какой-нибудь гравиконцентратор — тут ему словно все понятно становится, и сразу ему жить легче.

Все это так. Но в более-менее исследованных областях знаний существуют устойчивые и довольно точные научные термины. Я их по мере надобности буду объяснять; все объяснить, конечно же, не получится, а жаль.

В науке акустика ученые оперируют таким понятием как «слуховые пороги». Слуховые пороги — значения каких-либо характеристик звука (частоты, интенсивности, длительности и пр.), при которых еще возникает слуховое ощущение. Чем ниже слуховые пороги, тем выше чувствительность нашего слухового аппарата.

После проведения многочисленных экспериментов было установлено следующее: человеческое ухо улавливает звук, интенсивность которого 10^{-12} Вт/м², то есть 0 дБ (звуковое давление 2×10^{-5} Па). Верхний порог звукового давления равен 140 дБ, ниже которого еще слышен звук, выше 140 дБ человек чувствует просто боль, даже не просто боль, а сильную боль. Самый громкий звук примерно в десятки миллионов раз больше по звуковому давлению самого слабого. Устройство нашего уха поистине феноменально! По частоте человек улавливает и очень

низкие звуки, от 20 Гц, и очень высокие, до 20 кГц (музыкальные звуки находятся в диапазоне от 20 Гц до 5 кГц).

Мы в этом разделе по отдельности рассматриваем чувствительность нашей слуховой системы к частотам, громкости, продолжительности звука, тембру. Однако наш слух воспринимает частоту, интенсивность и протяженность звукового сигнала комплексным образом, улавливая даже мельчайшие различия между звуками со сходными параметрами.

Если задуматься, то это не очень странно. Ведь в природе не существует ни физических законов, ни формул, ни отдельных факторов и характеристик. В природе существует нечто целостное, комплексное; вообще говоря, кроме самой Природы в природе больше ничего не существует. Наш слабый мозг вынужден создавать теории, строить системы, проводить многофакторный анализ для того, чтобы попытаться понять, что к чему. Да и то не все люди разделяют этот подход. Целые школы и направления, например даосизм, буддизм, многочисленные практики йоги, отрицают системный подход как адекватный инструмент для понимания устройства природы и человека, придерживаясь холистических, целостных подходов.

Возвращаясь к нашим ушам, заметим, что без этой особенности нашего слуха, без возможности человека отслеживать минимальные отклонения в совокупности параметров громкость—тембр—длительность звука, невозможно было бы восприятие и распознавание речи. А ведь правда, хочется же услышать и понять то, о чем говорит другой человек! Хотя бы иногда!

Какие самые тихие звуки мы можем слышать?

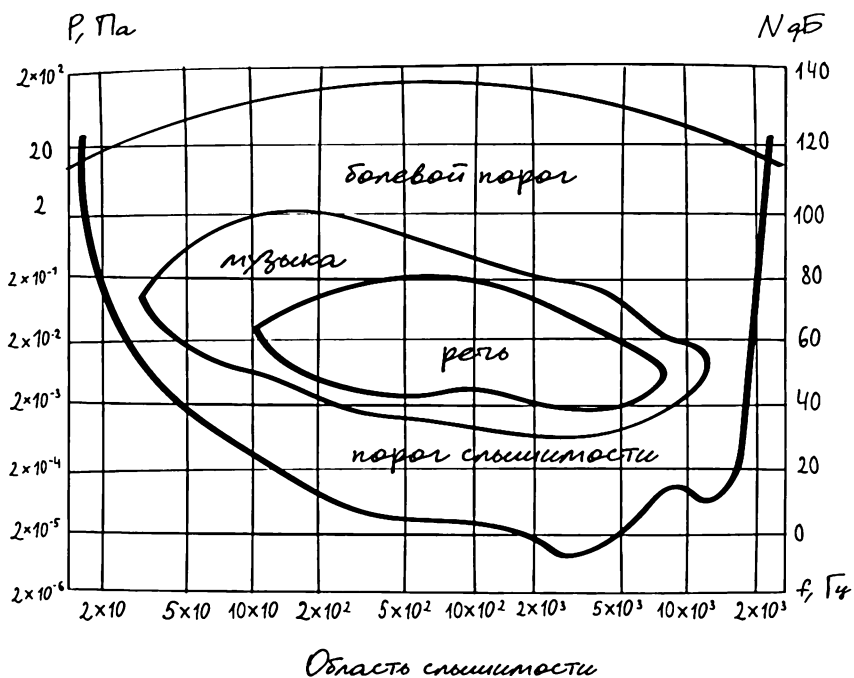
Слуховые пороги могут быть разделены на два типа: абсолютные и дифференциальные (относительные), как если бы определяли температуру предмета по абсолютной шкале (на сколько градусов в Цельсиях он нагрет) и пытались бы понять, какой предмет теплее — один или другой.

Абсолютный порог слышимости определяется как минимальное звуковое давление (в дБ), при котором еще возникает слуховое ощущение. Дифференциальные слуховые пороги отражают способность нашей слуховой системы определять различие между звуковыми сигналами по частоте, уровню звукового давления, временному интервалу.

Большая часть экспериментов по исследованию свойств нашего слуха, и слуховых порогов в частности, происходит следующим образом.



Слушатель сидит в «заглушенной» комнате, то есть в комнате без отражений звука. Прямо перед ним на некотором расстоянии помещается источник звука (скрипач, играющий музыку «клезмир», цыганский табор, хор китайских мальчиков или просто акустическая колонка). Уровень звукового давления (объективная величина) определяется с помощью микрофона, помещенного в точку расположения головы слушателя (рядом с головой, не вовнутрь). Измерение порога слышимости производится по методу так называемого балансного регулирования. Слушатель с помощью специальной ручки зеленого цвета изменяет интенсивность звука, уменьшая его до уровня, когда тон становится неслышимым, или увеличивая до уровня, когда тон становится слышимым. Измерения проводятся для звуков различной частоты. Экспериментаторы обычно стараются обследовать как можно больше людей — с разным слухом, тренированным и нетренированным, музыкантов и не-меломанов.



Полученная таким способом кривая порога слышимости чистых (синусоидальных) звуков одной определенной частоты показана на рисунке.

Видно, как порог слышимости меняется в очень широких пределах в зависимости от частоты. Наибольшей чувствительностью ухо обладает в области частот 2,5 кГц — 3,5 кГц, где порог слышимости имеет наименьшую величину. Этот частотный диапазон, средние час-

тоты, близок к частотному диапазону человеческой речи и музыки. Что и понятно: человек ведь не дурак, зачем ему придумывать такую музыку, которую он сам бы плохо слышал.

В области максимальной чувствительности, там, где слух самый «острый», он воспринимает давление около 10^{-5} Па. Любопытно, что звуковое давление, возникающее из-за флуктуаций (беспорядочных изменений) плотности воздуха, имеет при температуре 25°C величину 5×10^{-6} Па. Если бы ухо было всего вдвое чувствительней, оно слышало бы непрерывный шум бьющихся о барабанную перепонку молекул воздуха и шум от тока крови. То есть чувствительность слуха находится на пределе биологической целесообразности. Однако мы можем услышать удары молекул воздуха о барабанную перепонку, приложив к уху морскую раковину, усилив тем самым звук. Это так называемый «шум моря». Море, конечно, здесь ни при чем, хотя как знать?

Представленные на рисунке значения абсолютных порогов слышимости относятся к случаю, когда источник-громкоговоритель размещен прямо перед слушателем. Если перемещать громкоговоритель под разными углами относительно головы слушателя, то абсолютные пороги существенно меняются. То, что слуховые пороги будут различны при расположении источника звука не по центру, а справа, слева или сзади слушателя, объясняется влиянием ушных раковин за счет дифракционных и интерференционных эффектов — эффектов рассеивания и наложения звука, а также возникновения «акустической темы» от головы.

Пороги слышимости у различных людей сильно разнятся в зависимости от возраста, состояния слуховой системы, наличия заболеваний и т.д.

Абсолютные пороги слышимости зависят и от длительности звукового сигнала: если длительность сигнала мала (меньше 250 мс), пороги возрастают, то есть нам требуется большая интенсивность звука, чтобы его услышать. И только при длительности сигнала больше 250 мс значения слуховых порогов стабилизируются к норме (см. спектр разложения в ряд Фурье «пакетного» сигнала в главе «1.4. Обертоны, гармоники»).

Очень короткие по продолжительности звуки воспринимаются как щелчок. Нам требуется некоторое время воздействия звукового сигнала, чтобы можно было определить высоту тона. Причем величина этого отрезка времени зависит от частоты: при частоте 50 Гц требуется 60 мс, свыше 1 кГц — 10 мс. Если мы будем уменьшать длительность звукового сигнала частотой 1 кГц (приблизительно нота до 2-й октавы) с 200 до 20 мс, нам, чтобы услышать сигнал, придется увеличить его громкость на 10 дБ, то есть значительно.

Такое восприятие связано со свойством слуховой системы, называемым временной интеграцией (суммированием). Слуховой аппарат работает как аккумулятор, накопитель звуковой энергии за период

примерно 200 мс. Требуется накопить определенное количество энергии внутри этого периода для достижения порога слышимости, причем чем короче сигнал, тем больше должна быть интенсивность звука, чтобы его можно было услышать, и наоборот. Ухо интегрирует (суммирует) энергию внутри этого временного диапазона, поэтому период времени 200 мс считается постоянной интегрирования (суммирования) слухового аппарата.

**Какие самые громкие звуки мы еще можем слышать?
Как влияют громкие звуки на наш слух?**

Если самые тихие звуки человек просто не слышит и ничего при этом не чувствует, то самые громкие звуки вызывают болезненные ощущения и могут привести к разрушению слуховой системы, к глухоте. Звук громкости около 100 дБ соответствует одному из слуховых порогов, называемому «порогом неприятного ощущения». При достижении значения 132 дБ возникает ощущение давления на уши, подобное тому, которое бывает при взлете самолета. Потом возникает неприятное щекотание в ухе. Эта величина называется «порогом осязания». Наконец, звук в 140 дБ причиняет боль и называется «болевым порогом». Выше 140 дБ человек не слышит звуков, он просто чувствует боль.

То есть можно сказать, что динамический диапазон слуховой системы составляет 140 дБ (от 0 дБ до 140 дБ). Существующая современная техника звукозаписи и звукопередачи, даже цифровая, не может обеспечить такую величину динамического диапазона сигнала. Еще раз восхитимся талантом инженера человеческого тела!

При том, что слуховая система может воспринимать звуки в очень широком диапазоне, в основном она предназначена для обработки звуков средней громкости. Воздействие громких звуков (с уровнем выше 90 дБ) приводит не только к временному ухудшению слуха, увеличению порогов слуха, но и к необратимым изменениям в слуховой системе, вплоть до полной глухоты. Степень повреждения слуховой системы пропорциональна времени воздействия громких звуков. Чтобы как-то отслеживать вред, наносимый громкими звуками, были разработаны международные стандарты, которые регламентируют допустимое время пребывания в звуковой среде с высокими уровнями звукового давления (шума, музыки и пр.):

УРОВЕНЬ ШУМА, дБ	90	92	95	97	100	102	105	110	115
Т, ЧАСОВ В ДЕНЬ	8	6	4	3	2	1,5	1	0,5	0,25

Связь
объективных
и субъективных
характеристик
звука.

Какие звуки мы
вообще способны
слышать?

Исследования, проведенные корпорацией BBC, показали, что за последние десятилетия уровни абсолютной слуховой чувствительности значительно снизились у молодежи. То есть наша молодежь более «глухая», чем их родители и бабушки-дедушки в молодости. Пожалеем все вместе нашу молодежь и самих себя. Давайте хотя бы не использовать маленькие наушники для плееров, которые вводятся непосредственно в слуховой канал, не включать в качестве фона телевизор, пореже посещать места, где громкость музыки бывает запредельной (клубы, дискотеки и прочие «адские места»), говорить друг с другом медленно, печально, тщательно взвешивая каждое слово.

После прослушивания очень громкой музыки (громких звуков, шума) у человека возникает временная частичная глухота. Процесс восстановления нормальных слуховых реакций может продолжаться до 16 часов. Этот процесс называется «временный сдвиг порога слуховой чувствительности». «Временный сдвиг» начинает появляться при уровне громкости звука выше 75 дБ и увеличивается при повышении уровня сигнала. Наиболее «вредное» воздействие оказывают высокочастотные составляющие сигнала, «свистящие», «пронзительные» звуки.

Величина сдвига слуховых порогов пропорциональна логарифму времени воздействия. Изучая чувствительность слуха после воздействия громких звуков, можно заметить, что вначале пороги плавно снижаются, примерно через две минуты происходит скачок в ходе восстановления чувствительности, а затем пороги продолжают снижаться. Однако если время нахождения под воздействием громких звуков превышает некоторый предел, то полного восстановления слуха не происходит. Такое воздействие может привести к абсолютной глухоте, особенно опасной потому, что она связана с физическими, органическими изменениями, с повреждением волосковых клеток и поэтому практически не поддается лечению.

Какой высоты звуки мы можем слышать?

Глядя на кривые болевых порогов и кривые абсолютной слышимости на рисунке на с. 54, можно увидеть, что если продолжить эти кривые, то они как бы пересекаются. То есть чтобы достичь порогов слышимости на самых низких и самых высоких частотах, требуются уже настолько высокие уровни сигнала, что они сразу совпадают с болевыми порогом, не создавая ощущения звука.

Также из рисунков мы видим, что только звуки, попадающие в диапазон частот 20 Гц — 20 кГц, воспринимаются нами в виде слуховых ощущений. Нужно отметить, что природа не наградила людей достаточно острым слухом на высоких частотах, особенно если срав-

нить нас с собаками или кошками, которые слышат до 60 кГц, или с дельфинами (до 100 кГц). Наверное, природа решила, что в этом нет никакой необходимости. Вот бы с ней (с ним) подискутировать!

Звуки частотой 20 кГц могут услышать только люди в очень молодом возрасте. В среднем чувствительность слуха к высоким частотам снижается каждые 10 лет на 1 кГц. Примерно к шестидесяти годам порог слышимости по высоким частотам у женщин составляет около 12 кГц, а у мужчин снижение частотных порогов происходит быстрее и часто составляет 5–6 кГц. Однако если посмотреть на рисунок на с. 54, то можно увидеть, что музыка и речь занимают только небольшую часть слышимой области, как по частоте, так и по амплитуде. Музыкальные звуки находятся в частотной области от 40 до 5 кГц, а по громкости — от 40 до 100 дБ, поэтому возрастное изменение частотных порогов приводит к некоторому уменьшению яркости звучания обертонов, но не мешает слушать музыку и речь, тем более что часто люди помнят тембр какого-либо голоса или музыкального инструмента с ранних лет и он с того времени хранится в памяти в виде «частотно-амплитудной матрицы».

Возможно, вы отмечали постепенное снижение с возрастом чувствительности слуховой системы к высоким частотам, выраженное в обеднении воспринимаемого тембра звука. Например, по телефону не в 100% случаев удастся узнать голос собеседника, по одному или нескольким звукам гитары не всегда удастся определить музыкальную группу. Я встречал меломанов пожилого возраста, которые практически не слышали звуков (частот) выше 7–10 кГц, что не мешало им наслаждаться прослушиванием музыки, в то время как для меня такая музыка звучала очень резко из-за переизбытка высоких частот. Чтобы не печалиться по этому поводу, вспомним цитату из Екклесиаста: «Всему свой час, и время всякому делу под небесами. Время рождаться, и время умирать; ...время обнимать, и время избегать объятий; время искать, и время терять; время хранить, и время тратить; ...время молчать, и время говорить; время любить, и время ненавидеть...»

Какие по громкости звуки мы можем различать?

Исследователям также было интересно измерить минимальное изменение громкости звука (сигнала), которое человек может почувствовать, — то есть определить, какие по громкости звуки мы можем различать. Вот ведь неугомонные товарищи!

Как показали исследования акустиков, эти пороги (едва замечаемая разница в уровне громкости) сильно зависят от частоты сигнала: наименьшие значения (самая высокая чувствительность к изменению

Связь
объективных
и субъективных
характеристик
звука.
Какие звуки мы
вообще способны
слышать?

ям громкости сигнала) получаются на средних частотах (0,5–4 кГц), на низких и высоких частотах они возрастают. Например, при общем уровне громкости звука 60 дБ порог чувствительности для частоты 1 кГц составляет 0,8 дБ, а для частоты 200 Гц — 1,3 дБ. Кроме того, пороги сильно зависят от общего уровня сигнала: чем громче сигнал, тем меньшую разницу между сигналами можно услышать. Дифференциальный (относительный, разница между двумя звуками) порог слышимости на частоте 1 кГц при общем уровне 40 дБ составляет 1,25 дБ, при уровне 80 дБ — 0,6 дБ.

Для сложных музыкальных сигналов дифференциальные пороги (чувствительность к изменению громкости отдельных звуков) сильно зависят от типа прослушиваемой музыки (джаз, симфоническая музыка или пение а капелла), также от индивидуального опыта слушателя и свойств помещения. При пении а капелла, особенно соло, слушатель без труда различает нюансы изменения громкости исполнения; широко распространен прием «вибрато» — периодически меняющаяся громкость или тембр звука. При прослушивании симфонического оркестра такие же нюансы изменения громкости будут незаметны.

Так как динамический диапазон слуховой системы составляет около 120 дБ, при такой тонкой чувствительности слуха к изменению уровней громкости звуков можно применять гораздо больше градаций по громкости (современные технологии с легкостью позволяют это сделать), чем это используется в классической музыке, где указывается только шесть градаций от *fff* до *ppp*. Формально это так. На самом же деле для профессиональных музыкантов, исполняющих классическую музыку, эти деления громкости от *фортиссимо* до *пианиссимо* (от *fff* до *ppp*) являются лишь информацией к размышлению и не являются «категорическим императивом». Известно, например, умение Святослава Рихтера играть произведения «пианиссимо» так, что каждый отдельный звук рояля был слышен в каждом отдаленном уголке Большого зала Московской консерватории. Тончайшее управление звуком, красками, искусством, искусством возможного (и невозможного)...

Какие звуки по высоте мы способны различать?

Когда неутомимые акустики исследуют возможность человека различать два разных звука по высоте, они дают ему слушать одновременно один сигнал с определенной частотой (опорный сигнал) и дополнительный. Человек должен крутить ручку зеленого цвета, меняя частоту дополнительного сигнала так, чтобы отследить момент, когда можно будет различить на слух эти два сигнала. Таким образом строятся кривые зависимости дифференциальных порогов (чувствительности) от частоты и интенсивности сигнала.

Какой же неожиданностью для исследователей было обнаружить, что пороги слышимости колебаний высоты тона зависят от частоты и интенсивности сигнала. В области частот до 1 кГц при общем уровне звука 80 дБ пороговая разница частот звуковых сигналов равна примерно 1–3 Гц. Затем пороги начинают расти в области 4 кГц примерно до 10 Гц, выше определение различий по высоте резко уменьшается. Переведем эти величины в другие, привычные музыкантам, что позволит лучше понимать искусствоведов и музыкантов, пишущих о различных музыкальных строях и вообще пишущих о чем-нибудь.

Физической характеристикой высоты звука является частота звука, измеряемая в герцах. Музыканты оперируют понятием «ноты». Чтобы связать эти понятия, вспомним, что нота ля 1-й октавы соответствует звуку частотой 440 Гц. Нота ля 1-й октавы отличается от ноты ля 2-й октавы на интервал «октава», частоты при этом отличаются в два раза, то есть частота ноты ля 2-й октавы — 880 Гц. Разница в частотах двух соседних нот (ля и ля#) составляет 26,16 Гц (полтона, выраженные в герцах) для равномерно темперированного строя. Музыканты делят полтона на сто частей и называют эти части центами. То есть один цент, выраженный в герцах в районе ноты ля 1-й октавы, равен примерно 0,26 Гц¹. Как показали эксперименты, в этом диапазоне частот мы слышим разницу в высоте звука около 1 Гц. Эта величина соответствует 3–4 центам. Продолжая вычисления вплоть до области 4–5 кГц (верхний диапазон нот рояля), получим результат: чувствительность нашего слухового аппарата к изменениям высоты звука в музыкальном диапазоне составляет 1–4 цента. Это очень приличный результат (и некоторая новость для многих музыкантов). Результат тем более хорош, что эксперименты по определению чувствительности слуха к изменениям высоты звука проводились для не-музыкантов. У профессиональных музыкантов чувствительность слуха может быть еще тоньше, особенно применительно к своему «родному» инструменту, скрипке или роялю. Так, многие скрипачи часто могут с высокой точностью настроить свой инструмент, но испытывают большие сложности, если им нужно настроить рояль, не говоря уж о барабане.

Если говорить об уроках сольфеджио в музыкальной школе, вспоминается, что было легко отличить малую секунду от большой секунды в среднем диапазоне рояля. Средний диапазон рояля соответствует частотам 200–1000 Гц. На эту область частот приходится и максимальная чувствительность нашего слуха к различению двух близких по частотам звуков. В нижнем диапазоне рояля (30–50 Гц) чувствительность нашего уха к различению звуков по высоте ухудшается в 5–10

¹ Строго говоря, там нужно было бы, как и для определения высоты нот темперированного строя, воспользоваться степенной/логарифмической функцией, но мы этого делать не станем, различия в числах слишком малы, ошибки определения порогов чувствительности слуха существенно больше.

Связь
объективных
и субъективных
характеристик
звука.

Какие звуки мы
вообще способны
слышать?

раз. Вот почему музыканты и молодые «еще не-музыканты» с некоторым трудом могут различать похожие интервалы, малую секунду и большую секунду, в верхних и нижних диапазонах рояля.

Вообще говоря, исследователи-акустики считают, что наша слуховая система различает более 600 градаций высоты тона (140 градаций в диапазоне до 0,5 кГц и 480 градаций в диапазоне от 0,5 кГц до 16 кГц). Это позволяет нам с большим уважением относиться к экспериментам в области микротоновой и спектральной музыки. А также объясняет чувствительность нашего слуха к различным музыкальным строям, в том числе и к древним, нетемперированным.

Какие звуки по длительности звучания мы способны различать?

Мы поговорили о том, какие самые тихие и самые громкие звуки можно услышать, какие звуки по громкости можно различать, какой высоты звуки мы можем слышать, какие звуки по высоте мы можем различать. Казалось бы — всё. Эти знания позволяют нам создавать устройства, усилители и колонки, идеально передающие звуки «живых инструментов» (что является главным критерием для аппаратуры Hi-Fi).

Но создать такие системы почему-то не удается. Обнаружилось, что проблема состоит в том, что наше ухо чрезвычайно чувствительно к временной структуре сигнала. Звуки музыки не статичны. Они быстро сменяют друг друга, различаясь по протяженности и величине пауз между ними. При этом тембр отдельной ноты, взятой на инструменте, тоже меняется, наш слух четко отслеживает фазу нарастания звука (фаза атаки) и фазу спада звука. Получается сложная частотно-амплитудно-временная картинка. Человеческое ухо — принципиально нелинейная система, как в области тихих звуков, так и в области громких звуков. Способность воспринимать различия параметров звука в частотной области не связана однозначно с восприятием временной структуры сигнала. Механизм преобразования звука в слуховом аппарате не определяется только лишь преобразованием Фурье.

Короче говоря, инженеры и конструкторы делают прекрасные, красивые усилители и акустические колонки.

А музыканты говорят:

— Плохо ваши железки воспроизводят музыку, не похоже.

Инженеры им отвечают:

— Да врите вы всё, вы не можете слышать различий!

А музыканты твердят:

— Идите к черту, мы слышим, трудитесь дальше!

Инженеры идут пить пиво и думать.

Понятно, что какие-то различия во временной структуре сигнала, которые до настоящего времени еще недостаточно хорошо исследованы, являются очень важными для нашей слуховой системы. По ним она определяет «живое» звучание или отличает одну акустическую систему от другой. Потрясающей способностью к распознаванию частотно-тембрально-временной структуры звукового потока (иногда бессмысленного), речи абитуриентов, обладают преподаватели театральных вузов. По одной фразе, одному слову они могут определить регион, где родился человек, где он учился, и предположить возможные проблемы с голосовым аппаратом, в том числе и заболевания. Музыканты и просто люди с хорошим слухом могут легко уловить тончайший акцент или «неискренность» речи. Вспомним «Пигмалион» Бернарда Шоу или «Не верю!» К.С. Станиславского.

То, что исследование временной структуры звуков, музыки, речи является самой неизученной областью акустики на сегодняшний день, не означает, что она не исследуется. Наоборот, защищается масса диссертаций, проводится множество экспериментов, как в академических институтах, так и в лабораториях спецслужб.

Часть экспериментов по определению уровней временного различия сигнала проводится следующим образом. Слушателю в быстрой последовательности подаются два сигнала (высокий и низкий). Он пытается определить, поступает один сигнал или же два следующих друг за другом сигнала. Разница между началом сигналов в 2 мс уже бывает заметна испытуемому. Причем она не сильно зависит от частоты (временное различие даже обостряется для частот выше 1 кГц), а также от интенсивности звука. Это немного странно, ведь все остальные пороги чувствительности сильно зависят от громкости и высоты сигнала. Если необходимо оценить смысловое значение звука (речи, например), то эта разница увеличивается до 35 мс. Для определения высоты тона также требуется определенное время: для низких частот около 60 мс, для высоких — 15 мс.

Время установления и спада звука является характерной особенностью различных музыкальных инструментов. Изменяя время атаки или спада сигнала, можно существенно изменить его тембр. У большинства музыкальных инструментов время нарастания или спада лежит в пределах 5–360 мс.

Исследования чувствительности слуха к времени нарастания (установления) и спада сигнала позволили установить, что порог чувствительности для частот ниже 1 кГц оказывается равным 1 мс, для частот 1–10 кГц — 0,5 мс. То есть изменения времени атаки и спада звукового сигнала, меньшие этих пределов, оказываются незаметными для слуха.

Раз мы начали эту главку с описания требований к Hi-Fi и Hi-End системам, то и закончим этим же. Скажем пару слов о слуховой чувс-

Физика

Связь
объективных
и субъективных
характеристик
звука.

Какие звуки мы
вообще способны
слышать?

твительности к нелинейным искажениям, под которыми понимается появление в спектре звукового сигнала дополнительных спектральных составляющих (высших гармоник, обертонов). Это может явиться результатом компьютерной обработки или прохождения сигнала через цепь проводов и других электронно-механических устройств.

Пороги слуховой чувствительности существенно зависят от характера нелинейности: при появлении низших (второй, третьей) гармоник пороги слуха для тональных (одиночных, синусоидальных) сигналов составляют 0,1%, для фортепианной музыки 1–2%, для эстрадной музыки до 7%. Чувствительность слуха зависит от высоты (порядка) гармоник. Заметность гармонических искажений третьего порядка вдвое выше, чем искажений второго порядка, заметность искажений от пятого порядка и далее в 6–10 раз выше, чем искажения второго. Этим объясняется странное явление, что в хороших акустических системах, имеющих в основном нелинейные искажения низших порядков, пороговые значения составляют 1–2%, а в хороших транзисторных усилителях и цифровой аппаратуре, где возникают нелинейные искажения высоких порядков, уровни нелинейных искажений должны составлять сотые и тысячные процента, чтобы они были незаметны для слуховой системы. Очень сложно синтезировать тембр рояля, пианино. Очень сложно его записать и воспроизвести через акустическую аппаратуру без заметных искажений. Слух музыканта легко улавливает отличия и кричит: «Не верю!» Другое дело — эстрадная музыка. Тут большая точность в тембрах инструментов неважна, более важны ритм и громкость звучания.

Психофизические, субъективные характеристики звука (наряду с его физическими, объективными параметрами) имеют непосредственное отношение к восприятию музыкальных произведений как «живьем», так и в записи. Это происходит из-за того, что большая часть звуков музыкальных инструментов приходится на область существенно нелинейной зависимости громкости от интенсивности и частоты звука.

Отсюда следуют по крайней мере три простых вывода.

Во-первых, если вы слушаете на своем любимом кассетном магнитофоне, носимом на любимом левом плече, скажем, Сороковую симфонию Моцарта и уменьшаете плавно громкость звучания, качество звука разительно меняется. Пропадают низкие и верхние частоты, некоторые звуки и инструменты становятся не слышны (не говоря уж о гармонических искажениях!). «Обрезаются» верхние гармоники звуков музыкальных инструментов, искажаются профили восприятия средних частот, звук обедняется и «бледнеет». Вывод отсюда простой — не слушайте, товарищи дорогие, записи классической музыки на кассетных магнитофонах, так же как, впрочем, на CD и «виниле» тоже. Звук, который вы получите, будет сильно отличаться от ощущения

при прослушивании Сороковой симфонии (и любой другой симфонической, джазовой, индийской и иной прекрасной музыки) «живьем». В «хороших» акустических системах класса Hi-End часто не делают даже ручки регулировки громкости, так как громкость должна быть одна — «правильная», а все другие положения регулятора громкости заведомо являются «неправильными». А уж «эквалайзер» (регулировка усиления разных частот по отдельности) присутствует только в самых плохих и дешевых музыкальных аппаратах. Переходя на личности, могу сказать, что я при всей своей любви к прослушиванию музыки дома, обладая довольно обширной фонотекой и весьма приличной звуковоспроизводящей аппаратурой, записей классической музыки не имею. Хорошую музыку, господа, нужно слушать только «живьем»! А плохую музыку вообще не стоит слушать. Да и речь плохих людей тоже. Да и смотреть на них неприятно.

Во-вторых, скажем пару слов о восприятии «транспонированного» музыкального произведения, то есть о его восприятии при переносе из одной тональности в другую. Все хорошие музыканты знают, что сыграть ре-минорную токкату или фугу в ля-миноре — не одно и то же по ощущениям (не говоря уж о том, чтобы сыграть ее в до-мажоре). Это может показаться странным, ведь современный музыкальный строй у нас равномерно темперированный и по идее должен быть инвариантен по отношению к транспонированию. Но на практике при транспонировании сильно изменяется соотношение громкостей разных музыкальных инструментов, мелодий, тем. Принципиально меняются и тембры музыкальных инструментов, сильно меняя ощущение от произведения. Так что, господа, доверяйте музыкантам, когда они говорят, что в ля-миноре играть что-то плохо, а нужно сыграть это в фа-диез-миноре, хотя при этом есть риск сломать себе пальцы от обилия черных клавиш.

В-третьих, люди обычно недооценивают точность, «остроту» слуха, с которой они могут различать высоту звука, почему-то считая, что плохо настроенные гитара или рояль либо немелодично голосащий сосед для них являются нормой. В подавляющем большинстве случаев это не так. Любой человек обладает весьма острым слухом. Просто не нужно его «убивать» слишком громкой музыкой и посторонними шумами, прослушиванием «мелодии», исполняемой людьми с плохим слухом и голосом. Любой человек может получить наслаждение от прослушивания микротоновой музыки, музыки, исполненной в нетемперированных строях (китайской или индийской) — при должном настрое на музыку, конечно. Наше ухо способно улавливать тончайшие оттенки в музыке как по высоте, так и по громкости, тембру и длительности звуков.

Анатомия

- 2.1. СТРОЕНИЕ УША
- 2.2. КАК РАБОТАЕТ СЛУХОВАЯ СИСТЕМА ЧЕЛОВЕКА?
- 2.3. КАК МЫ ОПРЕДЕЛЯЕМ ВЫСОТУ ЗВУКА?
- 2.4. НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СЛУХА
- 2.5. БИНАУРАЛЬНОЕ СЛИЯНИЕ ЗВУКОВ И БИЕНИЯ
- 2.6. СЛУХОВАЯ МАСКИРОВКА И ДЕМАСКИРОВКА, «ЭФФЕКТ ВЕЧЕРИНКИ»
- 2.7. ОРГАНЫ СЛУХА У ЖИВОТНЫХ. ПРО КОМАРОВ И НЕ...
- 2.8. ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НЕЙРОФИЗИОЛОГИИ. МУЗЫКА МОЗГА. «ЭФФЕКТ МОЦАРТА»
- 2.9. БИОАКУСТИКА
- 2.10. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗВУКА НА КРОВЬ ЧЕЛОВЕКА



2.1. СТРОЕНИЕ УХА (ВНЕШНЕГО, СРЕДНЕГО, ВНУТРЕННЕГО)

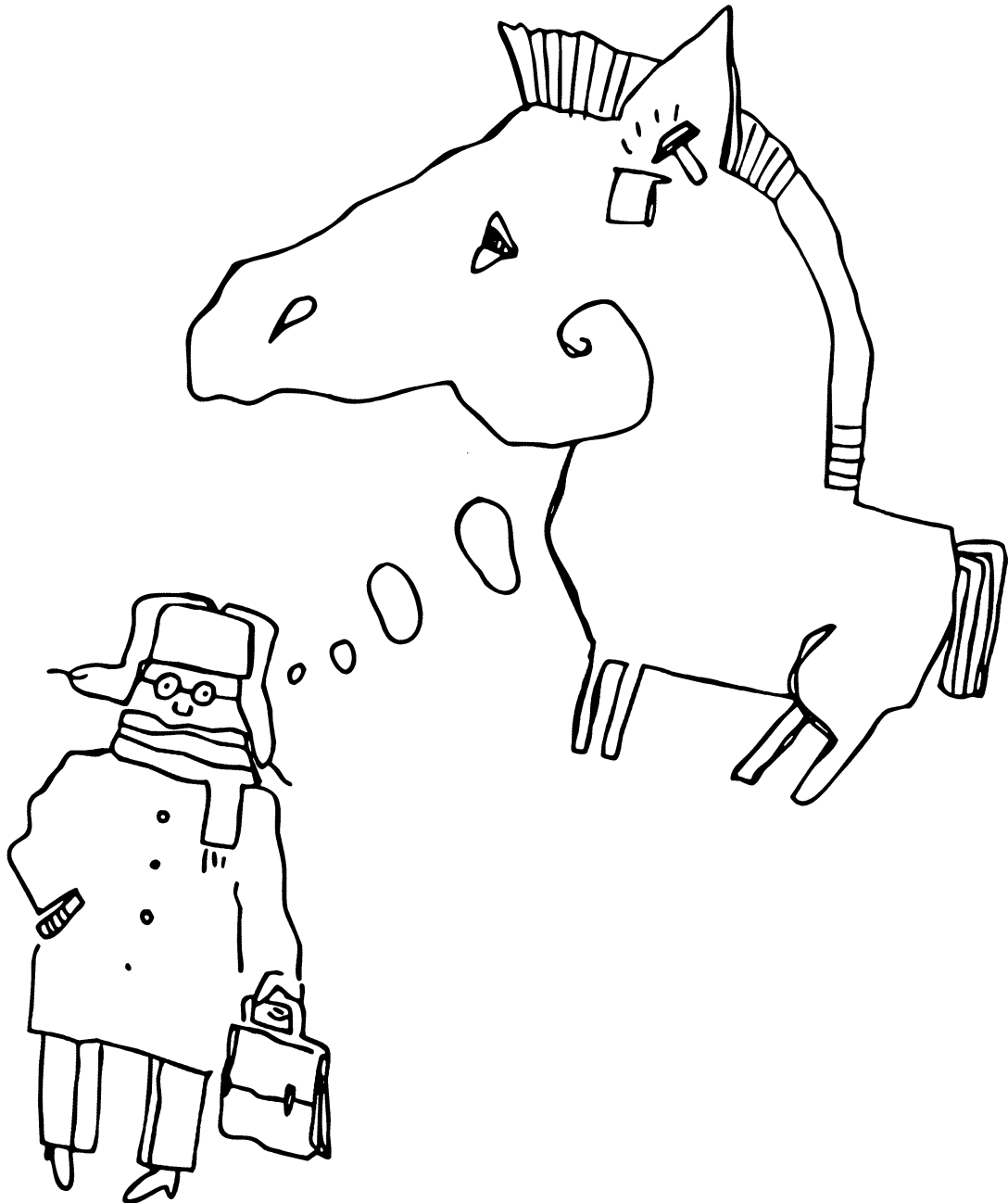
Как я уже писал в самом начале книги, когда я был школьником, у меня возникало много вопросов, касающихся непосредственно уха. Нашего, человеческого, уха. Непонятно было, как оно устроено и как работает. Вроде бы всё просто: ухо — человеческий орган, который в количестве двух штук прикреплен к голове. Скорее всего то, что мы видим, — некий вариант рупора наоборот. Эдакий прибор, усиливающий и направляющий поток звуковых волн в слуховой канал. На самом деле и это далеко не очевидно. Очень странная форма у человеческого уха, зачем — непонятно. Вот были бы у нас уши как у лошадей или собак (конусообразные) и вращались в сторону источника звука — было бы понятно. А так уши скорее отражают звук, идущий сзади. Ну и что? Это было первым непонятным вопросом.

В школьном учебнике биологии было нарисовано, как молоточек стучит по наковальне, зачем-то есть какое-то стремечко, и все это передает звук дальше, прямо в мозг. Даже тогда мне было ясно, что ни одна косточка не может стучать по другой косточке с частотой 20 кГц. И вообще, убогая какая-то конструкция, ненадежная, а ведь природа все стремится делать просто и надежно. Это было вторым непонятным вопросом.

Третий вопрос — как это молоточек, или что там есть еще, может передавать колебания, являющиеся суммой нескольких колебаний? Человек легко слышит одновременно 2, 3, 7, 10 звуков и легко различает их. Как же тогда устроено наше ухо?

Через какое-то время к этим трем вопросам добавился еще один, из современной жизни. Звук — это аналоговый сигнал. Аналоговая информация занимает весьма много места и с трудом обрабатывается. Сравните виниловые пластинки, CD, MP3 — насколько по-разному там используется объем информации. Как обрабатывает и хранит наш мозг аналоговую информацию? Непонятно.

Чтобы найти ответы, рассмотрим устройство нашего уха, без сомнения — одного из сложнейших и уникальных творений природы.



2.2. КАК РАБОТАЕТ СЛУХОВАЯ СИСТЕМА ЧЕЛОВЕКА?

Часть вторая

Анатомия

Как работает
слуховая
система
человека?

То, что мы обычно называем ухом, — это всего лишь наружное ухо, ушная раковина, рупор, не самая главная часть слуховой системы, вообще говоря. Человек может слышать звуки вовсе без ушной раковины, хуже, конечно, но может. Однако не будем их удалять у младенцев, как крайнюю плоть, крайнюю и ненужную вещь.

Обычно ученые, медики и я выделяем в слуховой системе человека три основные части: внешнее, среднее и внутреннее ухо.

Внешнее ухо состоит из ушной раковины и слухового канала, заканчивающегося тонкой мембраной — барабанной перепонкой. Внешнее ухо — часть слуховой системы, которая непосредственно соприкасается с жестоким внешним миром.



- 1 — ушная раковина и наружный слуховой канал
- 2 — барабанная перепонка
- 3 — молоточек
- 4 — наковальня
- 5 — стрелочка
- 6 — овальное окно
- 7 — полукружные каналы
- 8 — улитка
- 9 — круглое окно
- 10 — слуховой нерв
- 11 — вестибулярный нерв
- 12 — лицевой нерв
- 13 — евстахиева труба

С помощью пары (двух штук, разнесенных в пространстве) ушных раковин мы получаем возможность бинаурального (пространственно-го) восприятия, можем локализовать звуковой источник — определить направление, откуда исходит звук.

Направляя звуковую энергию в слуховой канал, внешнее ухо усиливает и заметно искажает характеристики воспринимаемого звука, особенно в диапазоне 3–10 кГц. Это важное замечание.

Слуховой канал представляет собой слегка изогнутую трубочку длиной около 2–2,5 см. Грубо говоря, это такая маленькая и короткая флейта или органная труба. В таких трубочках может возникать резонанс, то есть усиление звука, но не любого звука, а лишь определенных частот, ведь органная труба не все ноты воспроизводит, а только одну. Так и нашему слуховому каналу соответствует резонансная частота 2,5–2,8 кГц. Более-менее заметное усиление звука происходит в диапазоне 2–10 кГц, но собственно резонансная частота, максимальное усиление звука и, как следствие, максимальная чувствительность слуха приходится именно на 2,5–2,8 кГц. Усиление звука в слуховом канале составляет около 10 дБ. А совместная работа ушной раковины и слухового канала позволяет усилить звук, попадающий на барабанную перепонку в области 2–5 кГц, на 15–20 дБ! В сотни раз! Эта область частот соответствует области нашей с вами речи и музыки. Что и не удивительно. Мы хотим слушать и слышать речь и музыку хорошо. Но, как вы понимаете, нет ничего бесплатного. Усиливая одни частоты, слуховой канал искажает тембр сигнала, мы слышим совсем другой звук, отличный от того, что исходит из акустических колонок или из ротового отверстия депутата. Вспомним опять, что перенос из одной тональности в другую (смена частот основных устойчивых и неустойчивых тонов, тоники, субдоминанты и доминанты) приводит к заметному изменению в восприятии отдельных музыкальных тем и инструментов. Аккуратнее нужно транспонировать музыкальные произведения!

Более общим замечанием является то, что все наши органы чувств, и слуховая система в частности, передают нам совсем не объективную информацию об окружающем мире. Повторю: звуки, одинаковые по интенсивности, но разные по частоте, воспринимаются нами как звуки совершенно разной громкости. Выше какой-то частоты звука и ниже какой-то частоты мы вообще звуки не слышим. Наш акустический мир совершенно не похож на акустический мир дельфина или бабочки, и все эти миры совсем не похожи на «реальный мир». Звуковые (и зрительные) образы достраиваются до неких целостных образов у нас в головном мозге, что-то там непрерывно анализируется, отсекается, дополняется. То есть мы действительно живем в некоем выдуманном, иллюзорном, реально не существующем мире образов, в сансаре, майе, по определению наших друзей с Востока.

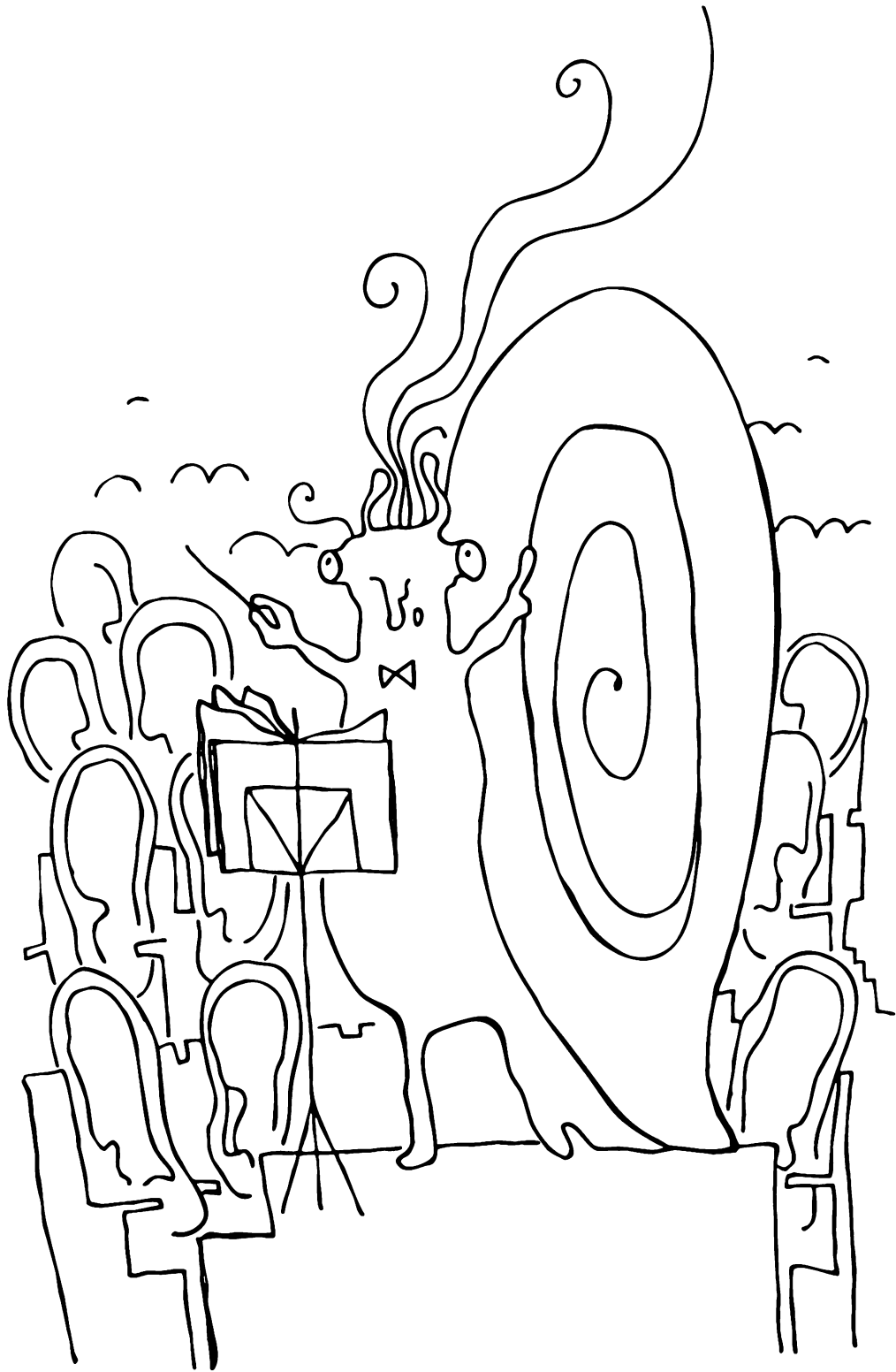
Но вернемся к физике-биологии.

Два уха позволяют нам довольно точно определять направление на источник звука. Основа этого — фазовый сдвиг. Грубо говоря, в одно ухо звук приходит чуть раньше, если источник звука не находится прямо перед нами. Локализация звуковых сигналов у человека по горизонтали составляет 3° , по вертикали — 10° . Кстати, локализация источников звука в вертикальной плоскости осуществляется очень необычным образом! В результате эволюции или долгого лежания на боку наши уши практически лишились подвижности. Но нам ведь важно оставить такую способность — понимать, где находится источник звука: сверху, снизу или еще где-то. Наши уши стали сложной формы — не конусообразными, как у наших предков, а складчатыми. Отражения звуков от складок ушной раковины и интерференция (наложение) волн на барабанной перепонке образуют сложную систему узоров, которые позволяют нам определять направление на источник звука в вертикальной плоскости. К тому же это приводит к возникновению «заусенца» на частотной характеристике нашего слухового аппарата в районе 10 кГц. Вообще возможность локализации сигналов по горизонтали с точностью 3° , по вертикали 10° — это неплохо, очень неплохо.

Структуры внешнего уха выполняют также и защитную функцию, оберегая барабанную перепонку от механических повреждений, поддерживая постоянную температуру и влажность; ушная сера создает на барабанной перепонке воскообразное покрытие. (Кстати, пару слов про то, нужно ли чистить уши. Чистить уши нужно, но лишь наружную часть, ушные раковины и вход в слуховой канал. Ни в коем случае нельзя засовывать ушные палочки глубоко в слуховой канал и с усилием там что-то делать! Это может повредить барабанную перепонку и нарушить естественные защитные механизмы слухового аппарата.)

Барабанная перепонка — тонкая пленка толщиной 0,074 мм и площадью около 68 мм², имеющая вид конуса, обращенного острием в сторону среднего уха. На низких частотах она движется как поршень, на более высоких на ней образуется сложная система узловых линий, что тоже имеет значение для усиления звука. Именно на барабанной перепонке происходит преобразование акустической волны в механические колебания, которые в дальнейшем обрабатываются в среднем ухе. Вот бы еще КПД этой системы посчитать!

Максимум, до чего мы можем докопаться снаружи, не разрушая черепа человека, — это барабанная перепонка. За ней находится *среднее ухо* — центр нашего слухового аппарата, удивительная и не познанная до конца конструкция. Правда, в этом оно практически не отличается от любого другого творения живой природы, они все не очень познаваемы. Но не будем агностиками, вернемся к нашим ушам. Среднее ухо — заполненная воздухом полость, соединенная евстахиевой



трубой с носоглоткой для выравнивания атмосферного давления. При изменении атмосферного давления воздух может входить или выходить из среднего уха, поэтому барабанная перепонка не реагирует на медленные изменения атмосферного давления — спуск или подъем. В среднем ухе находятся три маленькие слуховые косточки: молоточек, наковальня и стремечко. Молоточек прикреплен к барабанной перепонке одним концом, вторым он соприкасается с наковальней, которая при помощи маленькой связки соединена со стремечком. Основание стремечка соединено с овальным окном во внутреннем ухе, улитке. Какая-то хлипкая конструкция, правда? Зачем так сложно все сооружено? Посмотрим внимательнее, что делает среднее ухо.

Среднее ухо выполняет несколько функций.

Во-первых, оно защищает нас от слишком громких звуков (это называется еще акустическим рефлексом). При сильных звуках мышцы среднего уха рефлекторно сокращаются, существенно уменьшая передаваемое звуковое давление на внутреннее ухо. Из-за того, что период сокращения мышц составляет около 10 мс, среднее ухо не может защитить нас от слишком резких громких звуков, например звуков взрыва. В таких случаях нужно открывать рот, чтобы давление внутри и снаружи среднего уха выравнивалось через евстахиеву трубу, а лучше переехать в другую страну. Но зато среднее ухо хорошо защищает от длительных громких звуков. Конечно, до тех пор, пока мышца не устанет и наше ухо не начнет постепенно глохнуть и разрушаться. О! Теперь понятно, зачем создавать для передачи звуков конструкцию из трех косточек: одна соединена с барабанной перепонкой, другая — с улиткой, третья — связка. Такая система очень гибкая. В ней несколько степеней свободы. Если бы молоточек прямо входил другим концом в улитку, то при сильных механических колебаниях барабанной перепонки (громких звуках) улитка бы просто взорвалась. Зачем нам это надо?! А так конструкция из трех косточек просто слегка деформируется, а потом возвращается в первоначальное состояние.

Во-вторых, среднее ухо усиливает звук — просто за счет рычагового механизма системы косточек, молоточка, наковальни и стремечка. Помните Архимеда, который требовал точку опоры, чтобы с помощью рычага сдвинуть Землю? Если точка опоры рычага (палки, косточки) находится не посередине, а смещена вбок, то можно усиливать прикладываемое к одному концу рычага воздействие. Вспомним лом или гвоздодер. Так за счет эффекта рычага звуковое давление, передаваемое во внутреннее ухо, усиливается почти на 38 дБ по сравнению с тем, которое попадает на барабанную перепонку. В десять тысяч раз! Вот зачем нам нужны эти самые три косточки! Для усиления тихих звуков, малых колебаний барабанной перепонки, используя только лишь механику, правило рычага. Еще один момент, о котором стоит упомянуть: звук приходит к нам из воздушной среды, а анализируется

в жидкой среде, во внутреннем ухе. Из физики следует, что если бы такой переход был прямым, большая часть звуковой энергии просто бы отражалась из-за разности импедансов (сопротивления движению). За счет действия рычагового механизма системы косточек среднего уха и различия площадей барабанной перепонки и овального окна этот эффект демпфируется. Удивительная природа!

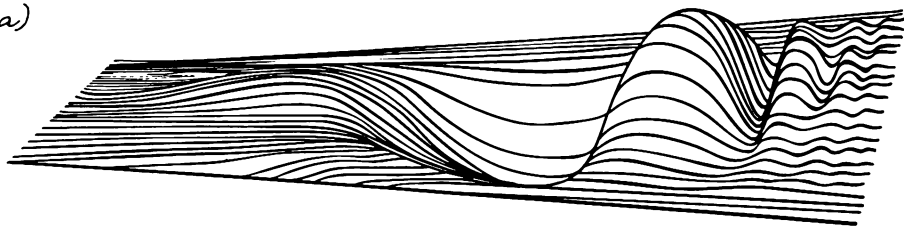
Обычно звук попадает во внутреннее ухо через наружное и среднее ухо. Но звук может туда попадать также через кости черепа. Особенно это заметно в области низких частот. Например, когда сверлят или полируют зубы с помощью низкочастотных свёрл, ощущения у пациента крайне неприятные, его почти оглушает. Когда лечат зубы с помощью высокочастотных свёрл — пациент счастлив, его ничего не беспокоит.

Внутреннее ухо находится в лабиринте каналов в височной кости, то есть внутри головы (голова — это то, что обычно находится вверху тела человека). Внутреннее ухо включает в себя орган равновесия (вестибулярный аппарат) и улитку (см. рисунок в начале главы). Это «сердце» нашей слуховой системы.

Улитка играет основную роль в слуховом восприятии. Она представляет собой трубку переменного сечения, свернутую трижды подобно хвосту змеи. В развернутом состоянии имеет длину 3,5 см. Внутри улитка образует чрезвычайно сложную структуру. По всей длине она разделена двумя мембранами на три полости: лестница преддверия, срединная полость и барабанная лестница. Сверху срединная полость закрыта мембраной Рейсснера, снизу — базилярной (основной) мембраной. Все полости заполнены жидкостью. Верхняя и нижняя полости соединены между собой через отверстие у вершины улитки (геликотрему). В верхней полости находится овальное окно, через которое стремечко передает колебания во внутреннее ухо. В нижней полости находится круглое окно, выходящее обратно в среднее ухо. Базилярная мембрана состоит из нескольких тысяч поперечных волокон. Ее длина — 32 мм. Ширина у стремечка — 0,05 мм (узкий конец), у геликотремы — 0,5 мм (толстый конец). На внутренней стороне базилярной мембраны находится орган Корти, а в нем — специализированные слуховые рецепторы — волосковые клетки. В поперечном направлении орган Корти состоит из одного ряда внутренних волосковых клеток (ВВК), их порядка 4000, и трех рядов наружных волосковых клеток (НВК), их около 12 000¹. Между рядами волосковых клеток образуется тоннель. Волокна слухового нерва пересекают тоннель и контактируют с волосковыми клетками. Орган Корти является основным механическо-электрическим преобразователем («слуховым микрофоном»). На входе мы имеем механические колебания, на вы-

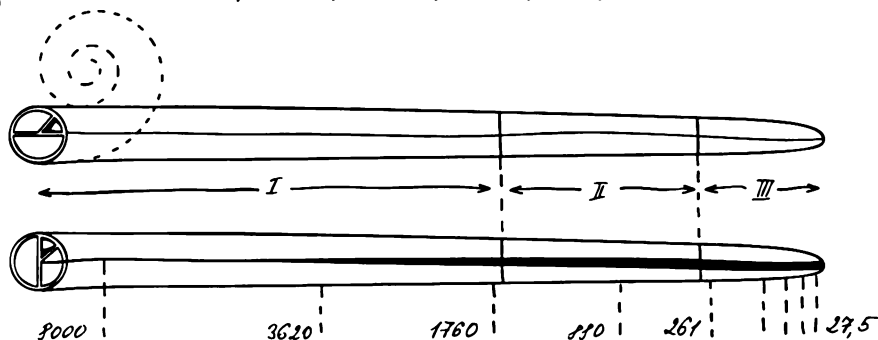
¹ Запомните эти сокращения: ВВК и НВК, они будут потом часто встречаться в тексте!

а)



б)

Улитка, которую хорошо раскрутили



На рисунке а) изображена белужья волна на базилярной мембране. Сама базилярная мембрана находится в середине основной части внутреннего уха — улитки.

На рисунке б) условно изображена улитка, если ее раскрутить. В толстой ее части (начале) находятся ВВК и НВК, чувствительные к высоким частотам звука (зона I), в тонкой ее части (в конце) — к низким звукам (зона III)

ходе — электрические. Очень сложная конструкция, непонятно, как она вообще работает!

Слуховой нерв представляет собой перекрученный ствол, сердцевина которого состоит из волокон, отходящих от верхушки улитки, а наружные слои ствола от нижних участков улитки. Войдя в ствол мозга, нейроны взаимодействуют с клетками различных уровней, поднимаясь к коре головного мозга и перекрещиваясь по пути так, что слуховая информация из левого уха поступает в основном в правое полушарие, а из правого уха — в левое полушарие. Обычно считается, что правое полушарие мозга преимущественно занимается обработкой эмоциональной, образной информации, а левое — смысловой,

логической. Сейчас такое радикальное деление функций полушарий головного мозга признается устаревшим. Многие функции головного мозга билатеральны, то есть осуществляются в обоих полушариях головного мозга и в других его областях. Главные зоны слуха находятся в височной области, при этом между обоими полушариями мозга имеется постоянное взаимодействие.

Наша слуховая система работает примерно так.

Звуковые волны проходят слуховой канал и возбуждают колебания барабанной перепонки. Далее, через систему косточек среднего уха, колебания передаются овальному окну, толкающему жидкость в верхнем отделе улитки (лестнице преддверия). В улитке возникает перепад давления, заставляющий жидкость переливаться из верхней половины в нижнюю через барабанную лестницу и геликотрему. Кроме того, воздействие стремечка на овальное окно оказывает давление на перепонку круглого окна, вызывая его смещение в сторону, противоположную движению стремечка. Такой эффект возникает из-за несжимаемости жидкости. При некоторых генетических дефектах круглое окно не развивается, и результатом становится такая же степень глухоты, как если бы среднего уха вообще не было, то есть потеря чувствительности около 60 дБ. Круглое окно — это дополнительный «предохранительный клапан», не дающий улитке повредиться, если стремечко слишком сильно и энергично залезет в овальное окно. Движение жидкости вызывает колебания базилярной мембраны, возникают стоячие и бегущие волны, в том числе одиночные — солитоны.

Преобразование механических колебаний мембраны в отдельные электрические импульсы нервных волокон происходит в органе Корти. Когда базилярная мембрана вибрирует, реснички на волосковых клетках изгибаются, создавая электрический потенциал, что вызывает поток электрических нервных импульсов, в котором есть вся необходимая информация о поступившем звуковом сигнале, музыке, работающем перфораторе соседа. Этот поток нервных импульсов попадает в мозг, где информация анализируется и принимается решение о том, какая реакция тела больше всего соответствует данному звуку. Можно начать убежать от злой собаки, если она зарычала. Можно прикрыть глаза и расслабиться, если вы в концертном зале и слушаете ноктюрны Шопена. Можно пойти к соседу и отобрать у него перфоратор.

То, куда поступает информация по нервным волокнам от внутреннего уха, отделы головного мозга человека, можно рассматривать как логический процессор (скорее всего фирмы Intel), который выделяет (декодирует) полезные звуковые сигналы на фоне шумов. Группирует их по определенным признакам, сравнивает с имеющимися в памяти образами, определяет информационную ценность и принимает решение о необходимых действиях.

Или еще проще. В ушной улитке есть чувствительные волоски и нервные клетки в количестве около 20 000. Даже больше, очень большое количество. Каждый волосок и соответствующая ему нервная клетка отвечают за свой узкий диапазон воспринимаемых частот. В нижней части спектра (низкие частоты) плотность волосков меньше (то есть на единицу длины приходится меньшее количество волосковых клеток), в верхнем регистре (высокие частоты) — больше. Вот почему музыканту трудно отличить малую секунду от большой секунды в нижнем регистре рояля, а в верхнем и среднем — запросто. (Хотя и в верхнем диапазоне непросто, но это уже из-за других причин.) Воспринимаемый улиткой (органом Корти) диапазон частот всем известен — от 20 Гц до 20 кГц. Причем чувствительность уха по частотам тоже неодинакова. У нее (у чувствительности) есть максимум на средних частотах. Логично было бы предположить (как, например, в случае с глазом: максимум чувствительности приходится на наиболее важные для человека цвета — желтый и зеленый), что максимум чувствительности к звукам приходится на область, наиболее важную для человека, — голоса других людей, то есть диапазон частот 0,2–0,5 кГц. Ан нет! Он приходится на 2–2,5 кГц. Это примерно верхний регистр рояля. Почему — не очень понятно.

Звук, состоящий из сонма волн разной частоты, разделяется в улитке на спектр, то есть нарезается, как сыр, на тоненькие пластинки. В физике это называется преобразованием Фурье. Объем информации при этом преобразовании уменьшается в тысячи раз (с учетом «обрезания частотного диапазона»). Вместо кучи странной формы волн, суммы множества синусоид мозгу нужно хранить лишь частоту сигнала, его амплитуду и, строго говоря, разность фаз между сигналами, приходящими в разные уши. Этакую двумерную матрицу, чистый «цифровой» формат! Ха! Лейбниц изучал «И Цзин», цикл Фу Си и придумал двоичную систему исчисления, основу цифрового формата. Изучай он строение наших ушей, пришел бы к тем же самым выводам!

Если рассуждать чисто математически, то Фурье-образ звукового сигнала хранит полностью всю информацию об изначальном звуке, сигнале. В области низких частот наше ухо сохраняет информацию о разности фаз между звуками, поступившими в разные уши. Именно это позволяет нам локализовать источник сигнала по горизонтали. В области высоких частот информация о фазах теряется, для локализации источника звука используется взаимная разность амплитуд между ушами, возникающая из-за звуковой тени головы. То есть если

слева от вас сидит Соловей-разбойник, издающий тонкие, пронзительные, свистящие звуки, то в левое ухо попадает один сигнал, а в правое ухо — более тихий сигнал. Эту разницу наша слуховая система способна различать. (А вообще, если такая ситуация случится, сходите лучше к психиатру.)

Так или иначе, образуются две матрицы, от двух ушей, отражающие амплитудно-частотную характеристику звукового сигнала. Дальше эту матрицу с помощью нейронов можно в двоичном виде передавать в соответствующие области мозга, где это все запоминается, сравнивается, анализируется, синтезируется. Хотя, конечно, мозгу нужно хранить и временную структуру звукового сигнала — вспомним, что тембр музыкального инструмента мы определяем по фазам нарастания и спада звука, фазам атаки и спада, нестационарным фазам. Тяжело нашему мозгу, непросто. Да и людям с их головным мозгом живется несладко, правда, без него еще хуже.

Но все равно, вместо аналогового сигнала одной ноты ля, взятой на рояле (или на любом другом инструменте), мозг хранит двумерную матрицу, где по горизонтали — гребенка частот, а по вертикали — их относительная амплитуда. Помните, как выглядят форма волны звука рояля или кларнета и амплитудно-частотная характеристика, спектр, двумерная матрица этого сигнала? Если забыли, см. рисунок на с. 38.

Звуки ноты ля на рояле и на скрипке отличаются тембром. А именно — соотношением гармоник, обертонов звучащей струны (с учетом резонаторов и других свойств музыкального инструмента). И поскольку каждая частота звука (в определенной полосе частот) соответствует своему волоску в улитке, а он — своему нервному окончанию, то, по идее, все люди должны обладать абсолютным слухом. Однако абсолютный слух встречается лишь у 1% населения нашей планеты, и это странно. Видимо, так решил естественный отбор.

2.3. КАК МЫ ОПРЕДЕЛЯЕМ ВЫСОТУ ЗВУКА?

Определение высоты звуков, которые мы слышим, — основная задача нашей слуховой системы. Именно по высоте звука (наряду с тембром) мы различаем и группируем различную информацию. Речь без модуляций и интонирования по высоте — безжизненна и малопонятна, в многотоновых языках, например китайском, вообще будет неясно, о чем человек говорит, если он говорит на одном тоне, на одной высоте звука. Также, естественно, на определении высоты звуков построена и вся музыка, которую мы слушаем — или не слушаем.

Важность определения высоты звуков для слуховой системы не случайна и, вероятно, вовсе не является результатом стремления всего человечества сочинять музыку. Восприятие высоты играет основную



роль в определении различных объектов в мире звуков и сепарировании, отделении их друг от друга. Природа вокруг нас наполнена разнообразными конкурирующими звуками: интересными, угрожающими, шумовыми. Все смешалось, и слуховая система несет ответственность за их выделение, идентификацию и классификацию. Высота звука есть главный индикатор, позволяющий отделять важный звук от других звуковых объектов.

Хотя в природе, конечно, не бывает простых звуков с одной выделенной частотой, синусоидальных, однако начнем мы с них — для простоты.

Высота простых звуков

Было проведено множество экспериментов по определению того, насколько точно мы можем различать два звука по высоте. В среднем диапазоне частот (область речи, музыки) слуховая система может различить по высоте два звука, отличающиеся всего на 0,2% по частоте. Это очень высокая точность.

Ниже частоты 500 Гц слуховая система может выделить примерно 140 градаций высоты тона, в диапазоне от 0,5 кГц до 16 кГц — примерно 480 градаций высоты тона (всего 620 градаций). В европейской музыке инструменты с равномерно темперированной шкалой используют порядка 100 градаций высоты тона, а не 620. Это обстоятельство вселяет оптимизм во многих музыкантов, пишущих и играющих музыку в древних и микротоновых музыкальных строях. А оптимизм — важная вещь для человека, без него сложно жить в нашем мире.

Ощущение высоты чистого тона (одной частоты) связано не только с частотой, но и с интенсивностью звука и его длительностью. Как показали различные исследования, при повышении интенсивности громкие низкие звуки кажутся еще ниже (!), а высокие звуки кажутся еще выше (!). Для средних частот 0,5–2 кГц влияние интенсивности незаметно. Эта зависимость для простых звуков незначительна, а для сложных музыкальных звуков почти незаметна. Что является великим счастьем для музыки, так как иначе при переходе от *pp* к *ff* звуковысотные отношения между нотами (мелодия и гармония) были бы нарушены, а музыканты, занимающиеся дома, играющие специально тихо, чтобы не ругались соседи, сходили бы с ума, ведь музыка, которую они играли бы дома, и музыка, исполняемая на концертном рояле на концерте в концертном зале, разительно отличались бы. Бы. Но природа пожалела музыкантов.

Восприятие высоты звука зависит и от его длительности, но об этом мы уже говорили.

Высота сложных звуков

В музыке простые синусоидальные тоны не используются. Каждый музыкальный тон имеет сложную структуру, состоящую из основного тона, гармоник и обертонов.

Однако можно установить соответствие по высоте музыкального тона, например ноты ля 1-й октавы, и чистого синусоидального сигнала с частотой 440 Гц. Воспринимаемые нами высоты звуков будут одинаковыми, но тембры — разными. Это свидетельствует о том, что для сложных периодических сигналов высота определяется по частоте основного тона (первой гармонике), так как именно он соответствует 440 Гц.

В музыке используются свои шкалы для сравнения различных нот по высоте — полутоны, тоны, квинты, октавы и другие музыкальные интервалы. Связь с психофизической шкалой высоты звука, построенной для чистых тонов, неоднозначна. До частоты примерно 5 кГц увеличение высоты тона на октаву связано с удвоением частоты. Например, переход от ноты ля 1-й октавы к ноте ля 2-й октавы соответствует увеличению частоты от 440 до 880 Гц. Но выше частоты 5 кГц это правило нарушается. Чтобы получить ощущение увеличения высоты на октаву, в 2 раза, нужно увеличить соотношение частот почти в 10 раз! При создании компьютерных и электронных композиций нет ограничений для того, чтобы воспроизвести какой-либо звук какой-либо частоты, есть только ограничения, связанные со вкусом человека. Поэтому создавать музыкальные произведения на компьютерах и синтезаторах нужно аккуратно. Как, впрочем, и детей, даже без предварительного компьютерного моделирования.

Ученые-акустики предложили две размерности высоты тона: психофизическую в мелах, пропорциональную логарифму частоты и установленную для чистых тонов (pitch height), и музыкальную, соответствующую названию нот (pitch chroma), которая может быть определена примерно до 5 кГц. (Интересно, что даже музыканты с абсолютным музыкальным слухом затрудняются в определении названий нот для звуков с частотой выше 5 кГц.)

Для объяснения механизма восприятия высоты как простых, так и сложных звуков используются две основные теории: теория места и временная теория.

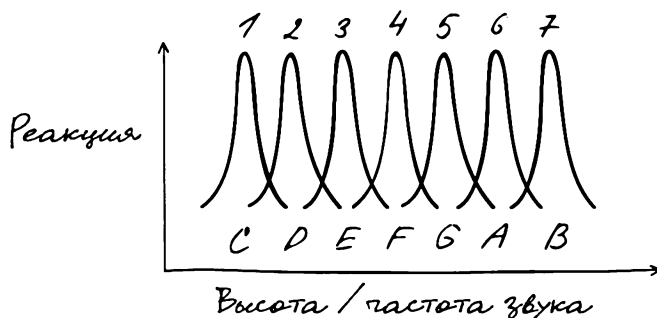
Теория места

Почему эта теория называется теорией места?

Базилярная мембрана вкупе с кортиевым органом способна выполнять частотный анализ сложного звука, то есть действовать как спектральный анализатор (выполняя прямое преобразование Фурье). Базилярная

мембрана организована весьма замысловатым образом. Каждый тон (каждая частота) имеет свое место (свою топографию) размещения на мембране, это свойство еще называется «топотопическим». Звуковой сигнал вызывает появление на базилярной мембране волны, но странная особенность возбуждения мембраны состоит в том, что максимум смещения стоячей волны разных частот располагается в разных же, определенных местах базилярной мембраны. Низкие частоты имеют максимум смещения вблизи вершины мембраны, высокие — вблизи овального окна. Природа этой особенности не вполне ясна. Каждая частота также имеет свое место максимума возбуждения на мембране, зависящее от тембра звука (спектрального состава, гармонического спектра). Волосковые клетки сообщают мозгу, какие частоты присутствуют в спектре звука. Таким образом, информация о звуке в мозг передается в виде кода, матрицы, основанной на том, нейроны каких участков активны, а каких — пассивны. Определяемая высота звука меняется при этом скачкообразно, ведь количество волосковых клеток и нервных клеток ограничено, а частота звука может меняться как угодно плавно.

Строго говоря, для сложных звуков, содержащих множество гармоник, это не совсем так. Ведь только для одной гармоникой высота звука будет меняться скачкообразно при изменении частоты. Когда слышимое количество гармоник велико, они попадают на разные участки «полосовых фильтров», левее, правее максимума. И эффект скачкообразного изменения восприятия высоты тона сглаживается, почти нивелируется.



Изменение реакции волосковых клеток от частоты звука

Таким образом, можно считать, что наша слуховая система содержит банк, набор «полосовых фильтров» (слуховых фильтров, пропускающих лишь звуки узкого диапазона частот) с перекрывающимися полосами. Их ширина выше 1 кГц составляет примерно 10–17% от центральной частоты. Например, на частоте 1 кГц ширина полосы составляет 160 Гц. С шириной слуховых фильтров связано известное понятие «критическая полоса» — внутри нее звуковая информация суммируется, интегрируется слухом. Если мы выйдем за пределы полосы,

произойдет скачкообразное изменение слуховых ощущений, что подтверждается многочисленными экспериментами. Наверное, это похоже на расческу, лучше всего не прямоугольной формы, а изогнутую. Зубья расчески соответствуют определенной полосе звука; проводя пером ручки Mont Blanc по зубьям расчески, мы услышим меняющиеся по высоте звуки. Теперь постарайтесь засунуть эту расческу себе в ухо. Впрочем, подождите и дочитайте книгу до конца. Потом.

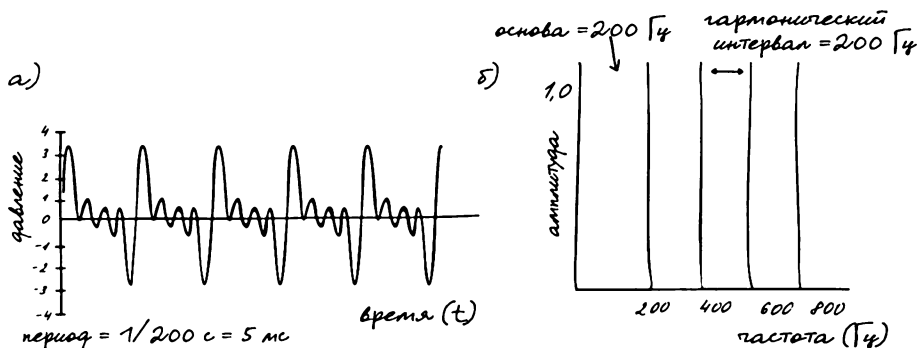
Итак. В соответствии с теорией места, при восприятии музыкального звука для слуховой системы существуют три возможности, три метода определения высоты звука:

1) определить, локализовать место на базилярной мембране основной (фундаментальной) частоты, первой гармоники и по нему (по месту) определить высоту тона;

2) найти минимальную разницу между соседними гармониками, которая при этом будет равна фундаментальной частоте $(n + 1)f_0 - nf_0 = nf_0 + 1f_0 - nf_0 = f_0$, где $n = 1, 2, 3, \dots$ — и принять ее за высоту звука;

3) найти общий наибольший сомножитель, который получается при делении частот всех гармоник на последовательные целые числа, и использовать его в качестве высоты звука.

Сомнения в правильности первого метода возникли, когда стало возможным электрическим путем синтезировать спектры сложных звуков. В 1940 году Шутен продемонстрировал, что ощущение высоты тона сложной периодической волны не изменится, если в музыкальном тоне вырезать фундаментальную частоту (первую гармонику).



На рисунке *а* изображена форма сигнала, музыкального звука, соответствующего приблизительно ноте *соль* малой октавы (200 Гц), включающего в себя звуки частотой 200 Гц (фундаментальная частота), 400, 600 и 800 Гц. Спектр этого сигнала изображен на рисунке *б*.

Звук с формой сигнала как на рисунке *в* также ассоциируется с нотой *соль* малой октавы (200 Гц), однако он не содержит в своем спектре (рисунок *д*) звука с частотой в 200 Гц, а содержит лишь частоты 400, 600 и 800 Гц. Это явление называется «феномен пропущенной фундаментальной».

Из рисунка видно, что присутствие фундаментальной частоты (первой гармоники) не обязательно для восприятия высоты и что низшая частота не всегда является основой определения высоты звука (!).

Эксперимент этот получил название «феномен пропущенной фундаментальной» и доказал, что первый метод не может служить единственной базой для определения высоты сложного тона, хотя он работает для подавляющего большинства музыкальных звуков.

То есть еще проще, если мы имеем звук с основной частотой 100 Гц и гармониками в 200 Гц, 300 Гц, 400 Гц и т.д., наше ухо считает, что мы слышим тембрально окрашенный звук высотой 100 Гц. Если мы вырежем с помощью современной техники первую гармонику в 100 Гц и оставим только гармоники в 200 Гц, 300 Гц, 400 Гц и т.д., то мы услышим все равно звук частоты 100 Гц, только с несколько отличающимся тембром. Важно это помнить, когда мы говорим о низких музыкальных звуках, например звуках больших органных труб. Там самый низкий звук, первая гармоника может лежать вне слышимого диапазона, но мы тем не менее опознаем этот звук как музыкальный и можем определить высоту его тона.

Однако с помощью компьютерных технологий можно создать ситуацию, которую не удастся объяснить и с помощью этого метода. Например, рассмотрим звук, в котором присутствуют только нечетные гармоники, скажем, 100 Гц, 300 Гц, 500 Гц, 700 Гц. Если фундаментальная частота, первая гармоника есть в спектре, то слух определяет высоту по ней, 100 Гц. Если ее вырезать, то расстояние между гармониками останется 200 Гц, но слух продолжит определять высоту тона, равную фундаментальной, также 100 Гц.

Третий метод позволяет объяснить и пропущенную фундаментальную, и наличие только нечетных гармоник, так как от отсутствия каких-то гармоник общий наибольший сомножитель 100 Гц не меняется. Данный метод позволяет также объяснить восприятие слабого ощущения высоты тона у колоколов и других не вполне периодических звуков.

В рамках теории места гармоника звука опознается, если «критическая полоса» слухового фильтра, соответствующая этой частоте, достаточна узкая и соседние гармоники внутри этого фильтра не попа-

дают. Если гармоники находятся настолько близко по частоте друг от друга, что внутрь одного слухового фильтра попадает несколько гармоник, то они не разворачиваются, то есть не распознаются раздельно. Какой бы ни была фундаментальная (базовая, основная) частота, слуховой механизм разворачивает (различает раздельно) только первые 6–7 гармоник — именно они и являются основными при определении высоты звука.

Но теория места не может объяснить ряд экспериментально обнаруженных фактов, например очень высокую точность определения высоты звука для тонов, чьи частотные компоненты не разворачиваются, то есть для звуков с гармониками выше седьмой.

Временная теория

Временная теория восприятия высоты основывается на анализе временной структуры звуковой волны. Эта теория использует синхронизацию разрядов нейронов органа Корти с фазой колебания базилярной мембраны (эффект запирающей фазы). При смещениях определенной точки мембраны в сторону расположения волосковых клеток в них возникает электрический потенциал, а при смещении в противоположную сторону — потенциал отсутствует. Благодаря фазовому запирающему времени между импульсами в любом отдельном волокне будет равно целому числу (1, 2, 3...), умноженному на период основного звука. Нервные волокна при этом могут кооперироваться при декодировании (распознавании) частот выше 300 Гц.

С моей точки зрения, более-менее подробное изложение временной теории определения высоты звука превышает допустимый уровень сложности изложения материала в этой книге. Интересующихся отсылаю к специальной литературе, например к статьям и книгам И.А. Алдошиной или к медицинской литературе.

Приведу лишь краткий вывод из временной теории определения высоты звука. Временная теория позволяет понять, как слуховая система определяет фундаментальную частоту звука на основе анализа временных интервалов между нервными импульсами от различных мест на базилярной мембране и по ней определяет высоту сложного тона. Однако временная теория не объясняет восприятия высоты тона на частотах выше 5 кГц, так как эффект фазового запирающего не срабатывает на этих частотах. Причина этого скорее всего в том, что никакой нейрон не может генерировать нервные импульсы быстрее 1000 раз в секунду из-за особенностей электрохимической динамики потенциала действия. Вероятно (!), в этой области частот меняется механизм восприятия высоты тона.

Напомню, что для звуков с базовой частотой выше 5 кГц в слуховой диапазон человеческого уха (до 20 кГц) попадают только две-три

слышимые гармоники ($20\,000 < 7000 \times 3$). Этого слишком мало для определения высоты звука. Поэтому восприятие высоты тона существенно обедняется и практически заканчивается восприятие музыкальной высоты (pitch chroma) звука. Скорее всего это было интуитивно понятно музыкантам, потому что на большинстве музыкальных инструментов клавиатура заканчивается в области 5 кГц.

Господа читатели! Эта область знаний, психоакустика, находится в стадии развития, бурного роста, как и многие другие области знаний, находящиеся на стыке физики, биологии, химии, нейрофизиологии. Не думайте, что уже все давно придумано и со всем уже давно разобрались высоколобые ученые мужи или жены. Это не так. Да и лоб часто бывает у них довольно узок.

Современная теория восприятия высоты тона

Ни теория места, ни временная теория не могут по отдельности объяснить восприятие человеком высоты звука. Мозг принимает информацию от периферийной слуховой системы как за счет определения места возбуждения на базилярной мембране (частотный анализ), так и за счет информации о форме звуковой волны (временной анализ). Причем и та и другая информация передается по одним и тем же нервным волокнам.

Современная теория объединила оба метода: сначала идет фильтрация сигнала по частоте с помощью развертки по месту, затем идет анализ по межимпульсным интервалам (до шестой-седьмой гармоники они соответствуют периоду каждой гармоники), выше — по периоду огибающей кривой. Поскольку период огибающей кривой равен периоду основной частоты, то здесь различие высоты тона определяется только по месту возбуждения. После определения общего периода данному звуку присваивается определенная высота. Таким образом, обе теории дополняют друг друга.

Объединение экспериментальных данных с теорией места и временной теорией дает следующее:

1) для музыкальных тонов с основной частотой от 100 до 400 Гц (с громкостью не менее 50 дБ) основную роль в определении высоты тона играют первые 5–6 гармоник (если их уровень превышает 10 дБ), то есть те гармоники, которые разворачиваются (распознаются) слуховыми фильтрами;

2) звуковые сигналы, содержащие только очень высокие гармоники (выше двадцатой), не вызывают ощущения высоты тона;

3) музыкальные сигналы, содержащие очень низкие частоты (с основной частотой ниже 50 Гц, например звуки больших труб органа)

вызывают ощущение высоты тона только по высшим гармоникам, так как такие низкие частоты не вызывают смещений базилярной мембраны — они на ней не размещаются, им не хватает места; при этом наиболее существенную роль играют пятые-шестые гармоники;

4) основная частота звука, если она выше 1 кГц, является определяющей, базовой в определении высоты тона;

5) музыкальные звуки, содержащие только неразвернутые гармоники (свыше шестой), могут дать ощущение высоты тона по огибающей кривой, при этом человеческий слух чувствует высоту звука довольно точно.

Обработка информации о высоте тона в нашей голове

Итак, звук попадает в весьма совершенный и очень необычно сконструированный микрофон (внешнее, среднее и внутреннее ухо), далее по «проводам» (по нервным волокнам) информация о звуке передается в компьютерный блок (головной мозг). Напомним, что по нервным волокнам от внутреннего уха в головной мозг передается вся информация о гармониках, обертонах звуков, без предварительной сепарации — конечно, с учетом вообще технических возможностей нашей слуховой системы.

Мозг группирует несколько тонов (гармоник) с одинаковым частотным интервалом в одно ощущение высоты тона. Это является принципиальным свойством нашего слухового процессора (высших отделов коры головного мозга). Из сложного внешнего звукового мира мозг выделяет звуки и группирует их по определенным признакам: месту, времени начала и конца, периодичности повторений. Это связано с тем, что кратковременная память человека оперирует только 6–7 символами и без группировки мозг не может принимать быстрых решений. То есть мы имеем дело со своеобразным компромиссом, которых великое множество в нашем организме.

Современная нейропсихология утверждает, что мозг мыслит образами. Музыкальные звуки тоже запоминаются в виде некоторых гармонических эталонов, шаблонов, матриц, статических или динамических. Наш мозг также любит достраивать неполные образы до целостных, используя только частичную информацию об образе. Это относится ко всем сенсорным системам: зрению, слуху, осязанию и др. Таким образом, Будда Гаутама был прав, говоря, что мы живем в сансаре, иллюзорном мире, имеющем малое отношение к действительности. Зато так проще, действительность не обжигает наше сознание. «Отрезвин» Станислава Лема не востребован в нашем мире. В нашем мире востребованы вещества, еще более затуманивающие сознание, хотя куда уж больше. Ладно, вернемся к нашим ушам и головам.

Головной мозг получает информацию от периферической слуховой системы о наличии компонент с кратными периодами в музыкальном звуке, группирует их и сравнивает с матрицей, гармоническим шаблоном, в котором имеются все последовательные гармоники. Для каждого входного сигнала по фундаментальной частоте подбирается гармонический шаблон, который лучше всего ему подходит. В соответствии с таким подходом фундаментальная частота выбранного шаблона и будет воспринимаемой нами высотой тона. Если два шаблона с разными фундаментальными частотами подходят к данному сигналу, можно услышать или неопределенную высоту, или две высоты. В случае отсутствия фундаментальной частоты сравнение производится по отдельным гармоникам. Если удастся подобрать хотя бы несколько гармоник, подходящих под эталон, то по повторяющемуся интервалу между ними присваивается высота звука. Наиболее важными для возникновения ощущения высоты тона являются первые 3–6 развернутых гармоник. Отдельные составляющие сигнала, которые ведут себя аномально (например, одна гармоника включается-выключается или резко отличается от шаблона), выделяются центральным процессором, и им присваивается отдельная, выделенная высота. Все вышеописанное является научной гипотезой, но — хорошей гипотезой.

Имеется много доказательств в поддержку данной гипотезы. Например, при подаче разных гармоник в разные уши одного человека через наушники (600 Гц в одно ухо и 800 Гц в другое) отчетливо слышен разностный тон высотой, соответствующей частоте 200 Гц. То есть центральная система сама синтезирует в разных ушах высоту из гармоник.

2.4. НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СЛУХА

Еще в 1714 году знаменитый скрипач Тартини заметил и описал странное явление: когда на скрипке громко проигрываются две ноты, можно отчетливо слышать третий тон, которого не было у исполнителя. Такие же дополнительные тоны можно услышать на звуках флейты при двухголосном звучании. Это явление вызвало большой интерес среди музыкантов и ученых, привело к постановке многочисленных экспериментов и позволило установить, что «фантомные» тоны отсутствуют в реальном звуке, они возникают непосредственно в слуховой системе и являются следствием ее нелинейности.

Интересно, что недопонимание этих процессов до сих пор приводит к недоразумениям. Например, когда люди с тонким музыкальным слухом отчетливо слышат дополнительные тоны при исполнении некоторых аккордов, а их коллеги не слышат ничего необычного.

Вообще система называется нелинейной, если выходной сигнал $Y(t)$ отличается от входного сигнала $X(t)$ наличием дополнительных



спектральных составляющих, нелинейных членов. Это имеет место, если связь между действующей силой (давлением) и откликом системы (например смещением) является нелинейной. Напомню, что линейная функция — это та, график которой представляет собой прямую линию, то есть выражается формулой $Y(t) = aX(t) + b$ или просто $Y(t) = aX(t)$.

Практически вся электроакустическая аппаратура (громкоговорители, микрофоны, акустические системы) является нелинейной, но эта нелинейность проявляется при достаточно больших уровнях входного сигнала. Принципиальным отличием слухового аппарата от электроакустической аппаратуры является то, что он производит нелинейное преобразование входного звукового сигнала как при большом его уровне, так и при очень малом, только механизмы этого преобразования различны. Вообще, человек — это принципиально нелинейная система, и даже внешне человек слабо напоминает прямую линию.

Нелинейность слуха проявляется прежде всего в появлении «субъективных», или «слуховых», гармоник. При воздействии на барабанную перепонку достаточно громкого синусоидального звука с частотой 100 Гц в процессе его обработки в слуховом аппарате возникают гармоники этого звука с частотами 200 Гц, 300 Гц и т.д. Так как мы точно знаем, что в спектре первичного воздействующего тона этих гармоник нет, они и получили название «субъективных» гармоник. Человек вообще сумасшедший.

Хочется исследовать «субъективные» гармоники. Но как их исследовать? Ведь они существуют только у нас в голове, их невозможно измерить простым прибором! Хитрые ученые придумали хитрый способ для их изучения. Количественно и качественно «субъективные» гармоники могут быть исследованы с помощью прослушивания биений. Это явление возникает, если на акустическую систему подать два близких по частоте тона, например 1 кГц и 1,01 кГц. Тогда вместо двух тонов будет отчетливо слышен один тон со средней частотой 1,005 кГц, модулированный по амплитуде частотой 10 Гц. То есть мы слышим биения. Если разницу между двумя тонами увеличивать, то при разности частот выше 15 Гц биения исчезают. Сначала начинают прослушиваться два тона с большой шероховатостью (как если бы звучали одновременно две ненастроенные струны), а затем отчетливо слышны два чистых тона. Наш слух очень чувствителен к биениям, поэтому, повторяю, они и являются основным методом настройки музыкальных инструментов.

Если к звуку, под действием которого возникают «субъективные» гармоники, например 500 Гц, добавить второй тон (скользящий), частоту и уровень которого можно плавно изменять, то при неточном совпадении частоты этого звука с частотой «субъективной» гармоники (например 990 Гц и 1 кГц) на фоне громкого основного звука можно

услышать биения с разностной частотой 10 Гц, возникшие в результате взаимодействия скользящего звука и «субъективной» гармоник. Такие же измерения могут быть сделаны и для гармоник более высоких порядков. Наиболее резкие биения будут прослушиваться при равенстве амплитуд «субъективной» гармоник и скользящего тона. Поэтому, регулируя амплитуду скользящего звука до получения наиболее четких биений, можно определить интенсивность «субъективной» гармоник. Эта техника называется «метод наилучших биений». Полученные результаты позволили установить зависимость величины «субъективных» гармоник от уровня основного тона: например, при уровне тона с частотой 1 кГц, равном 80 дБ, уровень второй «субъективной» гармоник оказался равным 63 дБ. Уровень гармоник существенно зависит от уровня основного тона: когда он становится ниже 40 дБ, эти гармоники становятся малыми и возникает ощущение чистого тона. При увеличении уровня интенсивности первичного тона величина «субъективных» гармоник резко возрастает. Что имеет существенное значение для восприятия слухом низкочастотных колебаний в диапазоне от 16 Гц до примерно 100 Гц.

Сами по себе эти эксперименты удивительны! Мы можем измерить интенсивность и громкость звуков, которых на самом деле не существует, они образуются лишь непосредственно в нашей слуховой системе. Однако, несмотря на то что в изначальном звуке этих дополнительных звуков нет, наш мозг считает их такими же реальными, как и все остальные, объективно существующие в изначальном звуке. Жалко, что подобных вещей не происходит с едой. Было бы неплохо наполнить желудок, скажем, субъективными огурцами высших порядков. Этот эффект называется вызванной отоакустической эмиссией (ВОАЭ).

Как устроено восприятие звуков в области низких частот? Вспомним, что базилярная мембрана организована тонотопически, то есть каждый тон имеет свою топографию размещения, свое место на базилярной мембране. В зависимости от спектрального состава на базилярной мембране возбуждаются различные участки, волосковые клетки, находящиеся на этом месте, изгибаются, и их электрическая активность сообщает мозгу, какие частоты присутствуют в спектре. Таким образом, базилярная мембрана выполняет функции спектрального анализатора, выполняет преобразование Фурье с помощью линейки частотных фильтров. Звук с частотой 100 Гц воспринимается почти самым крайним участком базилярной мембраны вблизи ее верхушки, на базилярной мембране фактически нет участков, воспринимающих колебания более низких частот. Однако область слышимых звуков простирается значительно ниже возможностей базилярной мембраны (мы хорошо слышим частоты ниже 100 Гц). Предполагается, что звуки с частотой менее 100 Гц ощущаются не сами по себе, а из-за создаваемых ими серий «субъективных» гармоник, попадающих в область

частот свыше 100 Гц, то есть, в конечном счете, из-за нелинейности слуха. Очень странно. Мы слышим то, чего физически слышать не можем (ниже 100 Гц базилярной мембране сложно работать) за счет того, чего на самом деле нет (за счет «субъективных» гармоник).

Второй формой проявления нелинейности слуха является появление «субъективных комбинационных тонов». Из физики и математики известно (правда, известно это только некоторым физикам и математикам), что если к нелинейной системе подвести два сигнала достаточно большого уровня с частотами f_1 и f_2 (например 0,8 кГц и 1 кГц), то нелинейные искажения вызовут появление комбинационных тонов с различными частотами. То есть появляются вторичные комбинационные тоны: $f_2 - f_1$ и $f_2 + f_1$ (0,2 кГц и 1,8 кГц), кубические комбинационные тоны: $2f_1 - f_2$ (0,6 кГц), $2f_2 - f_1$ (1,2 кГц), $2f_1 + f_2$ (2,6 кГц), $2f_2 + f_1$ (2,8 кГц). Для их количественной оценки также может быть использован «метод наилучших биений». Многочисленные эксперименты показали, что чаще всего слышны разностные тоны с частотами $f_2 - f_1$ и $2f_1 - f_2$ (0,2 кГц и 0,6 кГц). Почему? Кто же знает? Как говорил Козьма Прутков о глобальных причинно-следственных связях: «Щелкни кобылу в нос, она махнет хвостом».

Третий вид проявления нелинейности работы слухового аппарата — нелинейная компрессия, сжатие звукового сигнала. Уровень звукового сигнала в слышимом диапазоне меняется от 0 дБ до 120–140 дБ, то есть амплитуда звукового давления меняется в 100 000 раз, в то же время рабочий динамический диапазон слухового нерва (от шума броуновского движения молекул до насыщения) составляет 1000. Поэтому кроме функций спектрального анализатора наш слуховой аппарат выполняет еще и функции нелинейного компрессора-усилителя. Каждый человек должен постоянно ходить с мыслью, что у него в голове находится «нелинейный компрессор-усилитель», также неплохо именно с этой фразы начинать свое общение с девушками. Проверено — хорошо действует.

Так. Пойдем дальше. Мы помним, что наш слуховой аппарат состоит из трех отделов — внешнего, среднего и внутреннего уха. Экспериментально доказано, что преобразование сигнала во внешнем и среднем ухе — процесс линейный, а основная причина нелинейности заключена в механизме работы внутреннего уха (улитки). Улитка состоит из трех полостей, в которых находится жидкость. При ударе стремечка по мембране овального окна в жидкости возникает звуковой импульс, который распространяется из верхнего отдела в нижний и возбуждает базилярную мембрану. Исследования работы слуховой системы, выполненные знаменитым ученым Дьёрдем Бекеши, за которые он получил Нобелевскую премию, показали, что при высоких уровнях сигнала в жидкости улитки образуются вихревые потоки. Поскольку ширина полостей разная, то этот процесс похож на обра-

зование околodonных завихрений, когда вода ударяется о пологий берег. Вспомним прекрасные волнообразные рисунки на твердом песке широких пляжей Мальдивских (и некоторых других) островов! Появление завихрений искажает форму звукового импульса, а поскольку базилярная мембрана выполняет его спектральный анализ, то искажения и приводят к появлению дополнительных гармоник и комбинационных тонов. Таким образом, первая причина возникновения нелинейных искажений — это сложные гидродинамические процессы в жидкости улитки. Девушки, конечно, тоже очень нелинейны.

Для того чтобы рассмотреть вторую причину нелинейности, вернемся еще раз к механизму преобразования сигнала на базилярной мембране. Механические смещения мембраны передаются органу Корти через волосковые клетки, внутренние ВВК и наружные НВК, расположенные рядами вдоль базилярной мембраны.

Удалось установить, что ВВК связаны в основном с восходящими нервными волокнами, они сообщают звуковую информацию в вышние отделы мозга — «слуховые микрофоны», а НВК — с нисходящими нервными волокнами, они получают приказы от мозга. Именно эти наружные волосковые клетки и играют основную роль в нелинейной компрессии, сжатии звука. При больших уровнях сигнала они удлиняются (до 10% от основной длины) и тем самым как бы придерживают смещения базилярной мембраны, предохраняя внутренние волосковые клетки от слишком большого изгиба, а на малых уровнях сигнала усиливают смещения, как бы «подкачивая» энергию базилярной мембране. Это было выявлено с помощью современных экспериментов, позволивших обнаружить на очень низких уровнях сигнала отоакустическую эмиссию — излучение от внутреннего уха. Такая работа НВК на низких уровнях сигнала вызывает аномальное поведение некоторых комбинационных тонов. У меня же поведение НВК вызывает вопросы, по крайней мере к Дарвину, большие вопросы.

Измерения, выполненные с помощью анализа гамма-излучения от радиоактивного источника, размещенного на живой (!) мембране, показали, что зависимость смещения базилярной мембраны от уровня сигнала имеет вид нелинейной компрессии, сжатия. Механизм работает только в определенном диапазоне сигналов. При очень длительном воздействии громких звуков, а это сейчас происходит очень часто, НВК повреждаются и зависимость приобретает чисто линейный характер, что приводит к дальнейшему разрушению ВВК и слухового нерва. В конечном итоге — к полной глухоте.

То есть появление слышимых «слуховых» гармоник и комбинационных тонов является признаком нормальной работы слухового аппарата и свидетельствует скорее о хорошем состоянии слуха. Наш слух принципиально нелинеен. И причины его нелинейности обусловлены как гидродинамическими процессами в улитке, так и электромехани-

ческими преобразованиями в волосковых клетках. Нелинейность слуха проявляется как при больших, так и при малых уровнях звукового сигнала и играет ощутимую роль в восприятии музыкальных, речевых и прочих звуковых сигналов.

Сансара, как ни крути. Мы слышим совсем не те звуки, что «объективно» окружают нас. А те, что слышим, рожают у нас в голове удивительные и ни на что не похожие образы. То есть мы живем в каком-то собственном мире ощущений, восприятий, не очевидным образом связанных с внешним «объективным» миром. Кстати, отсюда следует небольшой, но практически значимый для меня вывод. Почти все производители акустической аппаратуры стремятся передать сигнал через колонки «без искажений». При этом те, которые действительно это делают (в большей или меньшей степени), так называемые мониторы, звучат очень плоско и невыразительно. Мне, например, нравится звук «резонирующих» колонок Sonus Faber, которые изготавливаются на тех же фабриках в Кремоне, Италия, где изготавливаются скрипки и виолончели. Звук заведомо идет «с искажениями» — но с какими! С очень приятными для уха «искажениями».

2.5. БИНАУРАЛЬНОЕ СЛИЯНИЕ ЗВУКОВ И БИЕНИЯ

Несмотря на то что в обычных условиях звуки поступают в оба уха с различием во времени, по интенсивности и спектру, мы воспринимаем один слуховой образ. Точнее, в оба уха поступают подобные, но не идентичные звуки, сливающиеся в единый образ. Этот процесс называется «бинауральное слияние».

Наиболее важными для бинаурального слияния являются звуки с частотой ниже 1,5 кГц, звуки низких и средних частот.

Бинауральное слияние речи, например, обнаруживается, когда в одно ухо поступают только высокочастотные компоненты речевого звука, а в другое — низкочастотные. И хотя ни одно ухо при этом не получает достаточной информации для распознавания речевого сигнала, однако слуховой образ, созданный бинауральным слиянием, позволяет понять речь.

Бинауральное слияние может быть продемонстрировано на эффекте, когда базовая частота звука отсутствует в его спектре (эффект «пропущенной фундаментальной»). При бинауральном прослушивании эффект возникает, даже если мы на одно ухо подаем четные гармоники (200 Гц, 400 Гц, 600 Гц...), а на другое — нечетные (300, 500, 700...): все равно будет идентифицироваться одна высота основного тона (в данном случае соответствующая 100 Гц).

Когда один тон подается в правое ухо, а другой, незначительно отличающийся по частоте, — в левое, в слившемся слуховом образе воспринимаются биения, которые лежат в основе определения консонансных и диссонансных интервалов звуков. Интересная особенность бинауральных биений состоит в том, что они проявляются даже при полной акустической изоляции обоих звуков, поступающих в левое и правое ухо. Очевидно, бинауральные биения возникают непосредственно в центральной нервной системе.

Бинауральные биения отличаются от моноуральных — слышимых только одним ухом. Моноуральные биения могут быть слышимы при взаимодействии тонов всего воспринимаемого диапазона частот, бинауральные биения связаны с низкими частотами, наибольшие бинауральные биения воспроизводятся при взаимодействии звуков с частотой от 300 до 600 Гц. Кроме того, бинауральные биения воспринимаются при большой разнице в интенсивности между звуками, подаваемыми в оба уха, даже в случае, когда один из звуков подается на подпороговом уровне его интенсивности, то есть неслышим отдельно.

Способность слуха различать бинауральные биения сподвигла многочисленных исследователей, врачей, инженеров к созданию «генераторов мозговых волн» (brain wave generator) и «музыки мозга». Они предположили, что если подобрать разность частот двух сигналов, поступающих в оба уха через наушники и совпадающих с альфа-, бета- и другими ритмами мозга (которые находятся в частотном диапазоне, не воспринимаемом нашей слуховой системой), то можно улучшить различные проявления активности человека или, наоборот, полностью разбалансировать работу нервной системы, это уж как повезет. Несмотря на огромное количество публикаций и конкретных коммерческих продуктов, использующих «музыку мозга» для коррекции нарушений сна, повышения способности к запоминанию информации, эффективность этой методики на сегодняшний день не доказана.

2.6. СЛУХОВАЯ МАСКИРОВКА И ДЕМАСКИРОВКА, «ЭФФЕКТ ВЕЧЕРИНКИ»

Желание передать по различным каналам звукового вещания все большее количество информации привело к разработке и широкому применению систем сжатия звукового сигнала (например, в стандартах MPEG), построенных на свойстве слуховой системы — маскировке.

Эффект маскировки связан с процессом взаимодействия сигналов, приводящим к изменению слуховой чувствительности к маскируемому сигналу в присутствии маскирующего.

Маскируемый сигнал воспринимается по-другому в присутствии другого сигнала. Это происходит из-за изменения слуховой чувстви-



тельности, из-за взаимодействия двух сигналов — маскируемого и маскирующего.

Взаимодействие тонов постоянно происходит в речи, в музыке и приводит к тому, что восприятие сигнала в присутствии другого сигнала изменяется. Меняется громкость, сигнал может вообще перестать быть слышимым (например, речь на фоне проходящего поезда), или изменяется восприятие каких-то отдельных спектральных признаков сигнала, то есть его тембр.

Процессы маскировки происходят в высших отделах головного мозга. Рассмотрим ситуацию: люди разговаривают между собой, периферическая слуховая система принимает звуковые сигналы, обрабатывает и направляет в высшие отделы головного мозга, где они распознаются и оцениваются. Если в какой-то момент речи возникает сильный шум, то периферическая слуховая система продолжает принимать оба сигнала, и речь и шум, направляя их в мозг. Однако в определенных отделах мозга речевые сигналы перестают восприниматься (не идентифицируются), и тогда обрабатывается только шум.

Процессы слуховой маскировки — достаточно сложное явление. В настоящее время они находятся в стадии интенсивных исследований во многих мировых научных центрах, поскольку от результатов этих исследований в значительной степени зависит прогресс в современной цифровой звукотехнике. А ведь технический прогресс — это важно, да?

Эффекты слуховой маскировки проявляются по-разному в зависимости от вида сигнала и способа его воздействия и могут быть разделены на следующие основные группы:

- одновременное (моноуральное) маскирование
- временное (неодновременное) маскирование
- центральное (бинауральное) маскирование
- бинауральное демаскирование
- постстимульное утомление.

Пожалуй, одно из самых любопытных свойств восприятия звуков человеком — бинауральное демаскирование. То есть способность выделять из акустического шума полезную для себя информацию.

Эффект бинаурального демаскирования еще называют «эффектом вечеринки» (cocktail party effect) из-за способности в общем разговоре вычленивать только одного слушателя. (Не нужно путать этот эффект с другим эффектом, когда наутро после вечеринки сильно болит голова; также этот эффект не стоит путать с постстимульным утомлением.)

Многочисленные исследования показали, что в основе этого явления лежит чувствительность к сдвигу фаз между сигналами при бинауральном восприятии звуков на частотах ниже 1,5 кГц.

На вечеринке шум поступает с разных сторон, а нужный сигнал — с одной стороны. Поворачивая голову, слушатель находит положение, при котором ему в оба уха поступает почти одинаковый шум. Тогда шумовой источник он слышит точно в центре, а интересующий сигнал локализуется в другом месте, ближе к одному уху, поэтому сигнал начинает хорошо прослушиваться. Этот механизм срабатывает только при наличии в спектре низкочастотных составляющих.

Я лишь упомянул явления, называемые маскировкой и демаскировкой сигнала. Интересующихся подробно данной темой отсылаю к работам многочисленных авторов, изучающих эту область психоакустики.

2.7. Органы слуха у животных. Про комаров и не...

Если считать теорию Дарвина о происхождении видов правильной, то мы можем попробовать проследить, как формировалась слуховая система человека в процессе эволюции. И вообще, интересно ведь посмотреть, как и чем слышат братья наши меньшие?

Про комаров и не...

Первым, кто догадался, где расположен орган слуха у комаров, был Хайрем Стивенс Максим. Тот самый Максим, который изобрел пулемет для кинофильма «Чапаев». В 1878 году на территории «Гранд-юнион отеля» в Нью-Йорке были установлены электрические фонари. Также там поставили трансформатор. В один из вечеров Максим, человек очень наблюдательный, заметил, что вокруг трансформатора летает масса комаров. Это были самцы: головы их украшали не простые антенны — «усики», а перистые. Но что притягивало их к трансформатору? К страшному, некрасивому трансформатору? Настал вечер, включили освещение. Загудел от вибрации сердечника трансформатор, прямо как человек, и полетели к нему отовсюду комары. Максим предположил, что орган слуха у комаров находится в антеннах, а гул трансформатора похож на звуки самок. Поэтому комары и устроили вокруг него столпотворение.

Хотя современники Максима отнеслись с недоверием к его открытию, он оказался прав. Действительно, комары улавливают звуки антеннами. Вернее, так называемым джонстоновым органом, расположенным в сильно увеличенном втором членике антенн и занимающим почти всю его полость. Джонстонов орган состоит из нескольких тысяч радиально расположенных сенсилл — микроскопических органов, в кото-



рых чувствительные нейроны объединены со специальными клетками. Сенсиллы натянуты между стенками второго членика и мембраной, соединяющей ее с третьим члеником. В результате малейшие колебания антенны передаются сенсиллам джонстонова органа, и информация о звуке поступает в центральную нервную систему комара. Комары-самцы способны различать звуки самок в диапазоне 20–600 Гц.

В отличие от комаров, у кузнечиков и сверчков уши находятся в голенях передних ног. За продольными узкими щелями скрываются полости, в которых расположены своеобразные барабанные перепонки — тонкие, туго натянутые мембраны, способные вибрировать. Но чтобы мембрана под воздействием звуковых волн могла колебаться, давление воздуха должно быть с обеих сторон одинаковое. У людей и у млекопитающих это достигается при помощи евстахиевой трубы, соединяющей среднее ухо с носоглоткой. Кузнечики и сверчки тоже имеют специальные приспособления, уравнивающие давление на мембрану. Воздушные клапаны идут через центры ног и открываются на верхушке груди. По ним и поступает воздух за барабанную перепонку.

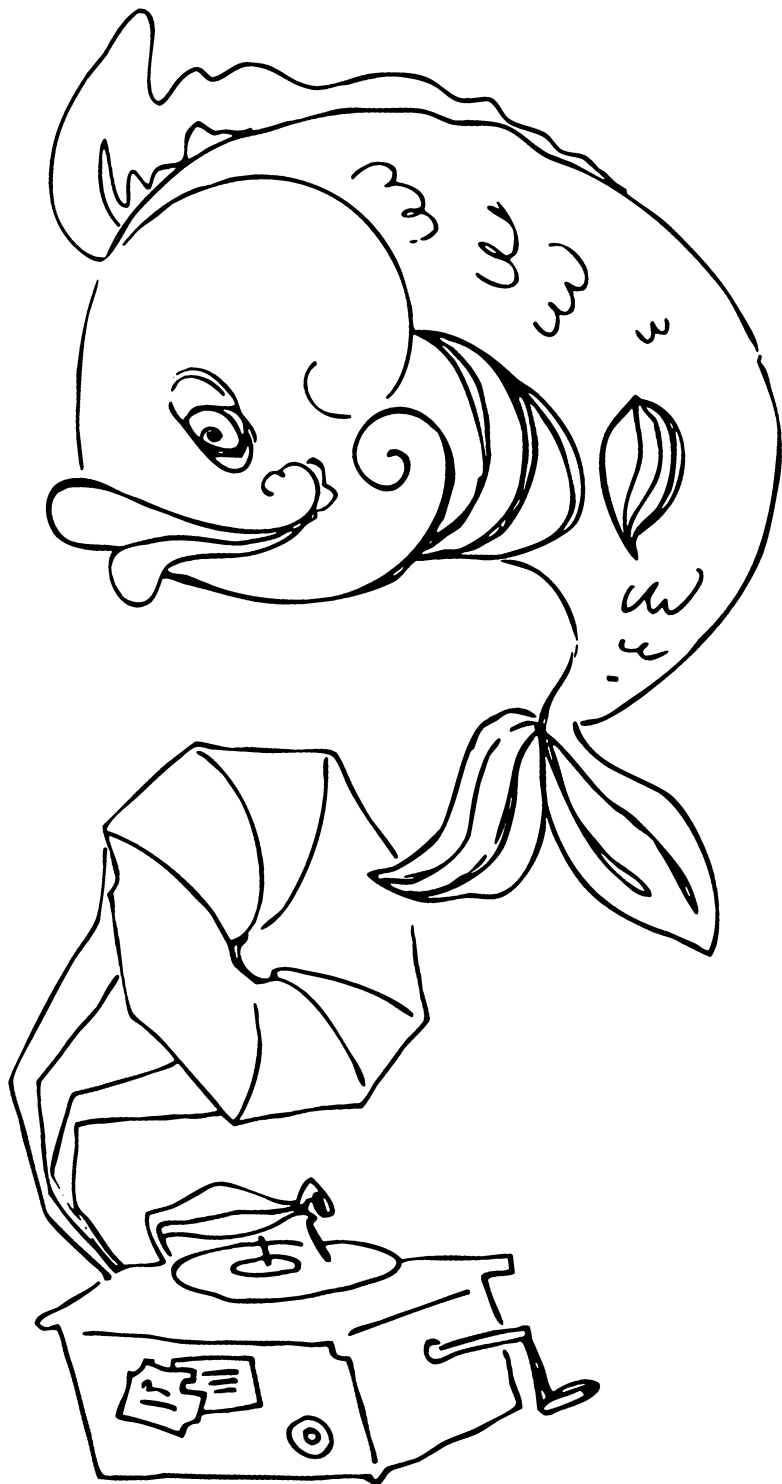
У пауков уши находятся вблизи кончиков ног. В хитиновом покрове есть несколько сквозных, параллельных отверстий. Снаружи они затянуты тонкой мембраной, такая же мембрана имеется на противоположной стороне отверстий. В полости между мембранами находится отросток чувствительной клетки, который воспринимает вибрацию паутины и звуковые колебания различной частоты.

Животные способны слышать звуки удивительной высоты. У бабочки Noctuid Moth верхний частотный предел восприятия составляет 250 кГц. И даже кузнечик воспринимает высокие частоты гораздо лучше нас с вами, его максимум распознавания звуков находится на частоте 50 кГц.

Ниже приведена таблица, где указано, кто как слышит:

Кто	Как (Гц)	Кто	Как (Гц)
ЧЕРЕПАХА	20–1000	СОБАКА СТРАШНАЯ	50–46 000
ЗОЛОТАЯ РЫБКА	100–2000	КОШКА	30–50 000
ЛЯГУШКА	100–3000	МОРСКАЯ СВИНКА	150–50 000
ГОЛУБЬ СИЗОКРЫЛЫЙ	200–10 000	КРЫСА	1000–60 000
ВОРОВЕЙ	250–12 000	МЫШЬ БЕЛАЯ	1000–100 000
МОЛОДОЙ ЧЕЛОВЕК	20–20 000	МЫШЬ ЛЕТУЧАЯ	3000–120 000
КРОЛИК	300–45 000	ДЕЛЬФИН (АФАЛИНА)	1000–130 000

Рыб долго считали не только немыми, но и глухими. Хотя еще в 1820 году Эрнст Генрих Вебер пришел к заключению, что слух у рыб



есть. Одни исследователи, наблюдавшие за поведением некоторых видов рыб и за их реакцией на звуки, делали вывод, что рыбы слышат. Другие же, наоборот, не видя какой-либо реакции, отрицали это. Их ошибка была в том, что отсутствие реакции — еще не показатель глухоты: данный звук просто мог не иметь для рыб никакого значения; ведь мы же не поворачиваем голову к любому, произнесшему слово «Динамо». «Спартак» — другое дело!

Естественно, у рыб нет органа, который присущ нам и многим другим млекопитающим и который мы называем ухом. Во-первых, он бы затруднял движение рыб в воде. А во-вторых, он им просто не нужен — их тело прозрачно для звука. Именно это обстоятельство и послужило в свое время для некоторых ученых аргументом, что рыбы не могут слышать.

Если продолжать сравнивать орган слуха рыб с нашим, то окажется, что рыбы не имеют и среднего уха, состоящего из барабанной перепонки и слуховых косточек. Подобное устройство им тоже не подходит: слишком часто в зависимости от глубины меняется давление. Зато хорошо развитое внутреннее ухо рыб, как и у нас, находится на голове, по обеим ее сторонам. Расположено оно в сложно устроенном лабиринте, состоящем из трех каналов (изогнутых полукругом трубок), которые идут перпендикулярно друг к другу. Полукружные каналы служат органом равновесия и прямого отношения к слуху не имеют. Но сбоку от них, в нижней части лабиринта, находятся два своеобразных органа — лагена и саккулус. Они и являются слуховыми приемниками. Если сравнивать орган слуха рыб с нашим, то интересно, что их орган слуха устроен очень похоже на человеческий орган равновесия. То есть слышат рыбы с помощью отолита, так же как и балансируют. А у людей в процессе эволюции кто-то заменил отолит на текториальную мембрану. Итак, лагена и саккулус воспринимают звуковые волны, раздражение по нервам передается в головной мозг, и в зависимости от поступившей информации рыба или реагирует на сигнал, или оставляет его без внимания. «Динамо!»

Несмотря на то что у рыб нет среднего уха, иные из них — карпы, сомы и многие другие — имеют с успехом заменяющий его орган. Этим органом является плавательный пузырь. Он соединяется с внутренним ухом при помощи веберова аппарата (четырёх пар косточек). Плавательный пузырь у этих рыб действует аналогично нашей барабанной перепонке. Вибрация его стенок передается через веберов аппарат и воспринимается внутренним ухом рыбы. Плавательный пузырь повышает чувствительность слуха и расширяет диапазон воспринимаемых частот. Это позволяет жителям водного мира слышать сигналы, раздающиеся на большом расстоянии. В частности, они хорошо понимают речь рыбаков, особенно немцев и финнов.

Но рыбы располагают еще двумя специфическими органами, с помощью которых они могут слышать звуки. Первый из них — кожа, ее рецепторы воспринимают интенсивные сигналы. Второй орган — боковая линия. Чувствительные клетки боковой линии похожи на клетки лабиринта: на вершине они оканчиваются волосками, а на противоположной стороне — веточкой нерва. Располагаются они внутри канала, который тянется вдоль туловища от головы до хвоста, и имеют выход во внешнюю среду. Почти у всех рыб есть по одному каналу с каждой стороны, однако у некоторых их бывает шесть и больше. Так же бывает и с людьми, особенно с левой стороны.

Органы боковой линии способны воспринимать звуки низких частот, до 0,5–0,6 кГц. Боковая линия не менее необходима рыбе, чем саккулус, лагена и плавательный пузырь.

Органы слуха земноводных, пресмыкающихся и птиц состоят из среднего и внутреннего уха. У млекопитающих в процессе эволюции или других каких-то процессов появляется наружное ухо (ушная раковина, наружный слуховой канал), в среднем ухе, соединенном с носоглоткой евстахиевой трубой, имеются три пары слуховых косточек (молоточек, наковаленка и стремечко), а лагена свернута в улитку.

Эхолокация и не...

Летучая мышь улавливает звуки частотой до 120 кГц. Напомню, что верхний предел звуковосприятия человека составляет всего 20 кГц.

Летучая мышь, или, как ее еще называют, мышь летучая, очень эффективно и необычно использует большую чувствительность к высоким частотам. Большинство этих тварей ориентируется в пространстве по звуку, непрерывно издавая высокочастотные пощелкивания и определяя расстояние до препятствий и добычи по отраженному сигналу. Чем выше частота импульсов, тем эффективнее работает система. Любопытно, что слуховой аппарат большинства мотыльков настроен так, чтобы чутко улавливать эти ультразвуковые импульсы: летучие мыши — их главные враги, так что чем раньше их услышишь, тем лучше. То, что летучие мыши издают щелчки, а не непрерывно свистят, тоже понятно: гораздо проще анализировать отраженный сигнал, эхо от одиночного импульса звука. При непрерывном звуке или длинных импульсах начинают влиять проблемы дифракции и интерференции. А зачем летучей мыши проблемы с интерференцией? И вообще, зачем ей проблемы?!

У дельфинов объем мозга примерно равен человеческому. Но на те отделы, которые отвечают за слуховое восприятие, приходится в десятки раз больше места, чем у *Homo sapiens*. Для ориентации в пространстве дельфины, как и летучие мыши, используют эхолокацию.

Они способны различать звуки на частоте до 100–130 кГц, что в 5–6 раз превышает верхний диапазон частот слышимых человеком звуков.

Киты тоже имеют «радарное устройство» и, как и дельфины, имеют свой язык общения. А как они поют, особенно когда ухаживают за самками! Верхний частотный слуховой порог у зубатых китов составляет 120–140 кГц, усатые заметно отстают от них. И не только киты. И даже без усов.

Слон медленно и уверенно обходит человека в способности слышать нижние частоты. Он способен различать звук частотой от 1 Гц, так что может тайно от людей переговариваться с сородичами.

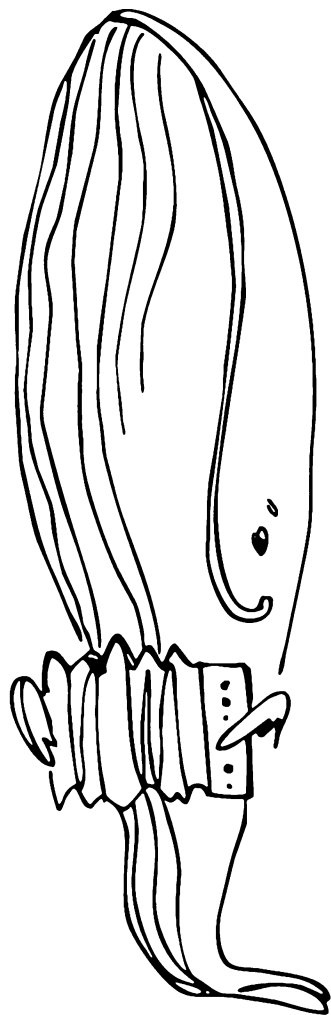
Кстати, вы знаете, почему у слона такие большие уши? Думаете, они ему нужны, чтобы лучше слышать? А вот и нет! Слон просто очень большой, много кушает, может быстро бегать, если нужда заставит. Он сильно разогревается при беге и ходьбе. Вот и придумала природа такой орган для слона — большие уши, которые нужны ему для охлаждения тела, охлаждения крови. Большие уши слона — это радиаторы, излучающие тепло, они пронизаны сетью крупных и мелких кровеносных сосудов. Кстати, китам и кашалотам для этих же целей служит хвост. Киты живут в холодных водах, и тело их покрыто толстым слоем жира. Но слой жира не только не позволяет холоду проникать вовнутрь тела, он мешает еще и охлаждаться телу кита, если он неожиданно сильно нагрелся, скажем, «убегая» от китобоев. Чтобы не умереть от перегревания, кашалот подает больше крови в свой хвост. Хвост не покрыт толстым слоем жира, он легко охлаждается, и охлажденная кровь идет в горячее сердце кашалота.

Эволюция органов слуха у позвоночных

Человек имеет позвоночник. Также он имеет множество других внутренних и внешних элементов и подсистем, например нос. Но почему-то некоторых животных, и человека в частности, называют именно «позвоночными», а не «печеночными» или «носатыми». Станные они, эти биологи.

Нас, вообще говоря, не очень интересует позвоночник, нас интересуют уши. Давайте их и рассмотрим. Как они росли.

То, что впоследствии стало ухом, изначально было органом баланса и равновесия и служило приспособлением для определения положения животного. Ученые исследовали слуховые пузырьки (статоцисты) у беспозвоночных, медуз и морских ежей, и эти исследования подтвердили такое предположение. Пытались распространить эту гипотезу и на рыб как представителей низших позвоночных. Биолог Крейдель, гуманный человек, в конце XIX века даже травил рыб стрихнином, чрезвычайно повышающим раздражительность, однако рыбы



никак не хотели реагировать даже на сильные звуковые раздражения. Возможно, больше всего их раздражал сам Крейдель, вытесняя все остальные мысли из головы. Эволюция, однако, шла своим чередом, не обращая внимания на Крейделя и его предшественников, и к функциям уха-предтечи добавилась способность воспринимать внешние звуки, столь важная в мире позвоночных («печеночных», «носатых», млекопитающих и других) способность.

Внутреннее ухо

Итак, наиболее древняя часть внутреннего уха — вестибулярная — образовалась на основе общего мешка, развившегося из канала боковой линии — органа улавливания вибраций в окружающей среде (воде) у рыб и водных земноводных. Этот орган представляет собой систему каналов по бокам тела и в области головы. Когда-то эти каналы имели форму открытых желобков. Чем беспокойнее становилась жизнь в водоеме, тем большей защиты требовала система органов боковой линии. Желобки начали изолироваться от внешней среды, каналы погрузились в глубь тела, сформировав специфические пузырьки, заполненные жидкостью. Нерв этой части органов боковой линии отделился от остальных и образовал рецепторы, воспринимающие механические колебания окружающей среды, что привело к развитию выделенного слухового нерва.

У миног, например, углубление на голове преобразовалось в две заполненные жидкостью трубки под прямым углом друг к другу — полукружные каналы и две камеры, утрикулюс и саккулюс. У акул и скатов появился третий (горизонтальный) полукружный канал. Все это вместе образовало мембранное преддверие, вестибулярную часть внутреннего уха, которое оставалось практически неизменным целых полмиллиарда лет. Немного, в принципе.

При перемещении жизни из воды на сушу животные обзавелись улиткой, слуховой частью внутреннего уха наземных позвоночных животных и человека. Образуется она как постепенное, изменяющееся от вида к виду выпячивание круглого мешочка преддверия (саккулюса). Если у пресмыкающихся это лишь небольшой выступ круглого мешочка, то у крокодилов он превращается в довольно длинный и изогнутый канал — крокодилы вообще довольно длинные. При дальнейшей эволюции органов слуха улитка сильно разрастается и образует несколько спиральных завитков: четверть витка у утконоса, полвитка у ехидны, полтора — у кита и ежа, у кролика — два с половиной, у кошки и собаки — три и целых три с половиной витка у жвачных животных. Человек — жвачное животное.



Среднее ухо

Плотность воздушной среды меньше, чем водной, и в связи с переходом животных от водного к наземному образу жизни возникла необходимость в усилении воспринимаемых звуковых колебаний. Эта потребность способствовала развитию среднего уха, которое появляется у животных начиная с бесхвостых амфибий (лягушек). Среднее ухо образуют косточки, сформировавшиеся из костей, которые у рептилий и у предков млекопитающих входили в состав челюсти (боже, какой, к черту, Дарвин?!). Окно улитки закрывается барабанной перепонкой, задача которой — передать звуковые колебания через слуховые косточки во внутреннее ухо. У лягушки барабанная перепонка располагается на поверхности, на одном уровне с кожей и передает сигнал на единственную слуховую косточку ее среднего уха — столбик (стремечко). Такая конструкция надежна, но совершенно не защищает от громких резких звуков; у человека для подобной защиты есть акустический рефлекс и гибкая система из трех косточек. (Могу предположить, что резкие сильные звуки способны убить лягушку, экспериментировать не буду.) Полость среднего уха соединена с ротовой полостью евстахиевой трубой, что уравнивает давление внутри полости среднего уха.

Еще в школьном курсе зоологии лягушка служила замечательной иллюстрацией эволюционного перехода жизни из воды на землю. Головастики — лягушкины дети — появляются на свет из икры, как мальки рыб, живут в воде, дышат через жабры, не имеют конечностей. Взрослая же лягушка способна жить как в воде, так и на земле, перемещается по земле с помощью лап, дышит легкими. Так же значительны и изменения в строении слуховой системы. Боковая линия, единственный орган слуха головастиков, уже через пару месяцев превращается в среднее ухо — орган слуха взрослой лягушки. Внешнего уха у лягушек и у других земноводных нет. Лягушка, конечно, очень интересный персонаж, однако все равно особой веры в эволюционную теорию Дарвина не возникает. Какая-то эволюция была, конечно, но при чем тут естественный отбор? Может быть, Бог придумал и эволюцию тоже? И Дарвина он придумал? Зачем он придумал еще и Дарвина на нашу голову?! Боже!

Как тут не вспомнить знаменитую молитву о душевном покое:

*Боже, дай мне разум и душевный покой
принять то, что я не в силах изменить,
мужество изменить то, что могу,
и мудрость отличить одно от другого.*

Обретя в очередной раз душевный покой, продолжим.

В отличие от земноводных, у прочих животных барабанная перепонка спрятана глубоко и к ней ведет наружный слуховой канал, достаточно длинный и для предупреждения нежелательных посетителей покрытый волосками и железами, выделяющими ушную серу. (Человеку, правда, это не помеха, он вооружен палочками для ушей.)

Слуховой проход является частью внешнего уха. Впервые внешнее ухо появляется у рептилий. По краю наружного слухового прохода закладывается складка кожи, помогающая направлять звуки в слуховой канал. У млекопитающих эта складка получила хрящевой остов и теперь именуется ушной раковиной. Очевидно, что строение наружного уха зависит от образа жизни. Если все время лежать на диване и/или на боку, внешнее ухо разгладится, а потом и вовсе отомрет. У многих видов млекопитающих ушная раковина велика и достаточно подвижна, что играет важную роль в определении направления на источник звука. Вспомним хотя бы уши зайца: они большие. У диких животных ушные раковины никогда не бывают опущенными. В процессе одомашнивания острота слуха и быстрота реакции становятся для животных менее важными, а более важными становятся преданность, послушность, безотказность, вялость, депрессивность. У таких животных (и некоторых менеджеров) уши всегда опущены вниз. С уменьшением подвижности ушной раковины происходит атрофия мышц, изменение размеров и формы ушной раковины. Результат — вислоухие кошки, длинноухие собаки, а также овцы и некоторые породы свиней с опущенными ушами.

У людей мышцы,двигающие ушную раковину, сохранились в основном в рудиментарной форме, поэтому так ценится среди людей и школьников умение двигать ушами.

Отдельно стоит сказать несколько слов о строении слуховой системы птиц. Ухо птиц, устроенное несколько иначе, чем у млекопитающих, работает, однако, по тем же законам (законам физики) и решает аналогичные задачи. Наружное ухо — это решетка из перьев, прикрывающих барабанную перепонку и защищающих ее от механических повреждений; оно практически не несет акустических функций. Среднее ухо содержит всего одну косточку и хрящевой элемент (экстраколумеллю), связывающий ее с выпуклой барабанной перепонкой. И всего одну мышцу. Относительно наличия у птиц улитки ученые спорили еще в начале прошлого века. Укороченная, расширенная, напоминающая сардельку, половина которой занята широкими, затянутыми перепонкой окнами, птичья улитка очень мало походит на привычную спираль млекопитающих.

Наличие слуховой коры отличает слуховую систему млекопитающих от птичьей. Большие полушария птиц лишены слуховой коры.

Слуховые центры представлены группами беспорядочно расположенных мелких нейронов, не образующих слоев. Этот тип организации слухового центра называется ядерным, в отличие от коркового, свойственного млекопитающим.

С формальной анатомической точки зрения, слуховая система птиц выглядит проще и поэтому иногда рассматривается как эволюционный предшественник слуховой системы млекопитающих. Однако это не так. Птицы и млекопитающие имеют разных предков внутри группы рептилий, и развитие шло параллельным путем, поэтому правильнее рассматривать их слуховые системы как независимо возникшие, параллельно развивавшиеся, одинаково успешно обслуживающие тех, кто их использует. Хотя — можно ли считать людей такими же успешными, как и птицы? Летать-то мы не умеем!

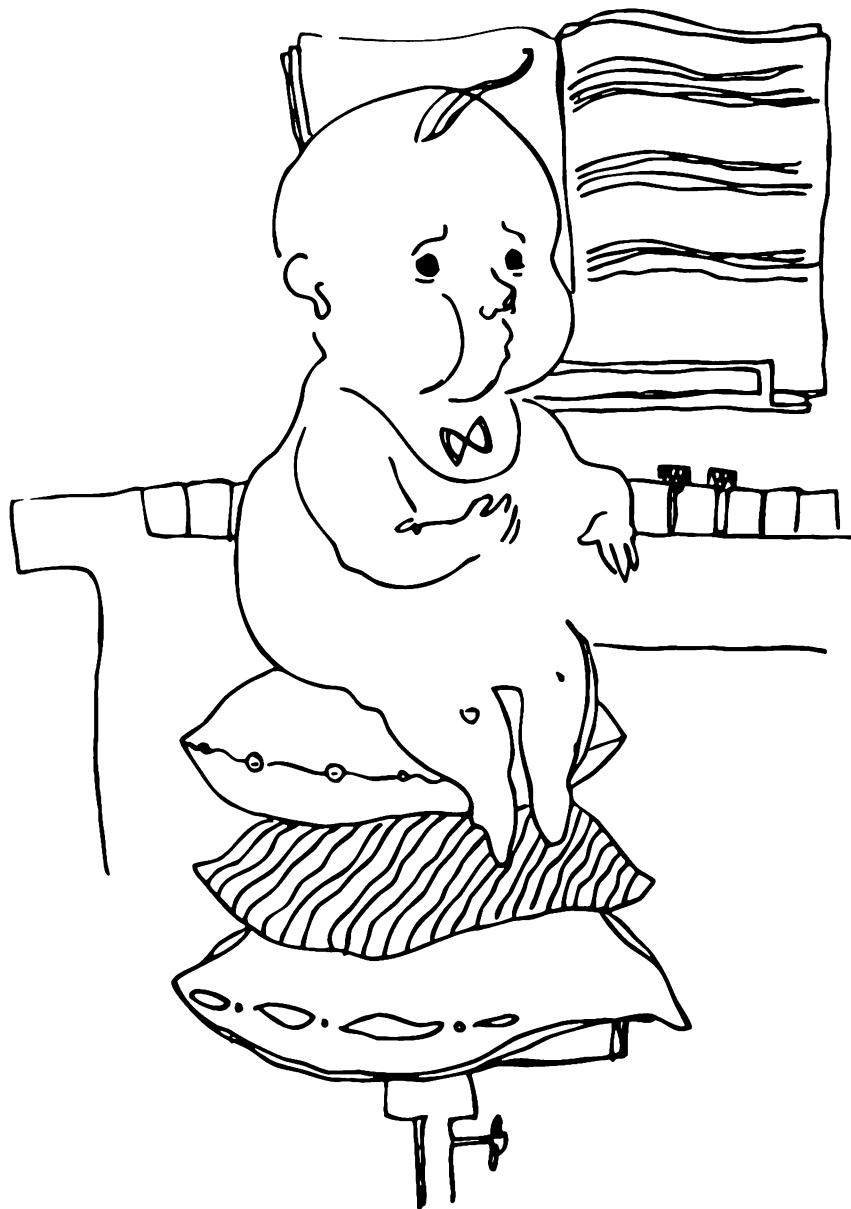
2.8. Восприятие звуков с точки зрения нейрофизиологии. Музыка мозга. «ЭФФЕКТ МОЦАРТА»

В предыдущих главах можно было найти более-менее научное описание строения органов слуха. То, как наш мозг воспринимает звуки речи, музыку и другие шумы, является предметом исследования многочисленных научных работников, околонаучных работников и совсем не научных деятелей. Думаю, что в ближайшее время появятся вразумительные и стройные теории в этой области, пока же остановимся на том, что известно сейчас, стараясь не делать никаких лишних предположений и не вдаваясь в мистику. Итак, поехали дальше.

Как мозг реагирует на музыку?

Как мозг реагирует на музыку? Простой ответ известен — науке об этом ничего не известно. Точнее — нет никаких точных, выверенных данных практически ни о чем. Начиная с того, что мозг вообще очень сложно и непонятно устроен, заканчивая тем, что музыка бывает очень разной. Различна и реакция мозга на музыку. Сложно выделить какие-то закономерности.

Музыка может вызывать физическое наслаждение у человека: у него бегут мурашки по спине, он испытывает радость. Примерно такое же наслаждение, как от вкусной еды, занятия сексом, приема некоторых наркотиков. Выделяются вещества, эндорфины и аналогичные им, которые напрямую воздействует на центр наслаждения. Это экспериментально доказано. Ну и что?



Казалось бы, мы имеем дело с нерешаемой задачей. Если мозг является слишком сложной системой, то невозможно понять, как он работает. Это так. С другой стороны, если мы не знаем, как работает машина, мы можем попробовать ее сломать и понаблюдать за сломанной машиной, например — слить масло из двигателя автомобиля и посмотреть, что будет. Так же и с мозгом. Встречаются люди, у которых есть какие-то патологии, нарушено функционирование головного мозга, какие-то части отсутствуют или просто заблокированы. Поэтому для ученых, исследователей головного мозга, нейрофизиологов, большой интерес представляли люди с черепно-мозговыми травмами, инсультами и другими поражениями головного мозга. Можно было исследовать, что у них работает, а что — нет, и как оно работает, то, что работает. Это не циничный подход — часто исследователи, медики существенно помогают больным сделать их жизнь богаче и ярче.

В 1933 году медики обследовали французского композитора Мориса Равеля. У него появились симптомы локальной мозговой дегенерации — заболевания, сопровождающегося атрофией отдельных участков мозговой ткани. Мыслительные способности Мориса Равеля не пострадали: он помнил свои старые музыкальные произведения и хорошо играл гаммы. Но сочинять музыку не мог. Говоря об опере «Жанна д'Арк», которую он только собирался написать, Равель признавался: «Опера у меня в голове, я слышу ее, но никогда не напишу. Все кончено. Сочинять музыку я больше не в состоянии». Он умер спустя четыре года после неудачной нейрохирургической операции.

Исследования таких больных выявили странную вещь — в человеческом мозге нет определенного, одного центра, отвечающего за восприятие музыки. У разных людей возбуждаются самые различные участки головного мозга. Эта информация была подтверждена позже с помощью современных методов нейровизуализации, когда мы можем, используя хитрую аппаратуру, наблюдать, какие части мозга активируются, а какие «засыпают».

Для речи такой центр есть. В височных областях. Но речь нами в основном воспринимается не как музыка, а как поток информации. Самая главная информация из речи — что означают слова, то есть прежде всего анализируется смысловая часть акустического потока от оратора. Однако люди с хорошим слухом также воспринимают и анализируют тембр, интонацию, временную структуру звука. Многие люди с хорошим музыкальным слухом могут выделять из речи собеседника информацию о том, лжет человек или говорит правду, где он изучал иностранный язык и т.д. Все это относится к тембрально-интонационной составляющей звуков речи, и такая информация обрабатывается уже не только в височных областях мозга. Когда мы слушаем музыку, головной мозг активирует несколько различных областей мозга за пре-

делами слуховой коры, включая те, которые ответственны за другие аспекты мыслительной деятельности.

Приведем еще один пример. После перенесенного в 1953 году инсульта русский композитор Виссарион Шебалин оказался парализован и перестал понимать речь, но до самой смерти, последовавшей через десять лет, сохранил способность к сочинительству. Что подтверждало предположение о независимой переработке музыкальной и речевой информации. Однако более поздние исследования внесли уточнения, связанные с двумя общими особенностями музыки и языка: и музыка, и язык являются средством общения и обладают синтаксисом — набором правил, определяющих «правильное» соединение элементов (нот и слов, соответственно). Анирудх Пател из Института нейробиологии в Сан-Диего опубликовал результаты исследований, проведенных методами нейровизуализации (функциональной магнитной томографии), которые говорят о том, что за «правильные» языковой и музыкальный синтаксисы отвечает один и тот же участок фронтальной (лобной) коры, другие отделы мозга отвечают за переработку иных компонентов языка и музыки.

Итак, нет специального, одного центра в головном мозге для восприятия музыки. Любое чувственное восприятие может рождать образы, все органы чувств — обоняние, осязание, зрение, но музыка в этом ряду единственная, которая задействует почти все области головного мозга в той или иной степени. У некоторых людей встречается некое смешение сенсорных сигналов. Известен «цветной» слух у Скрябина, Римского-Корсакова, бывает «перехлест» и других областей восприятия. Человек иногда воспринимает цвет как шершавый или теплый. Музыку и отдельные звуки, ноты человек может ассоциировать с цветом, запахом. Этот эффект называется синестезия. До сих пор психиатры не пришли к единому мнению, является ли это психическим отклонением и требует вмешательства или это просто особенность отдельных талантливых людей.

Мое мнение довольно просто: всё не так просто. В каком-то смысле гениальность — это вообще отклонение от нормы. Это ненормальность. Но гениальных людей не стоит лечить, разве что только от гриппа. Их стоит беречь. В то же время и не все ненормальные являются гениями. Найди грань, попробуй.

В явном виде опыт переkreщивания ощущений возможно получить при помощи психотропных препаратов, тогда человек вообще может не понимать, какие органы чувств у него задействованы. Это болезненное состояние, и не стоит к нему стремиться, к тому же в отдельных случаях прием подобных препаратов способен привести к тяжелым нервным расстройствам. Поэтому такие препараты легально используются только в медицинских исследовательских центрах.



Но не всё так печально, что-то ученым удалось понять, они стараются. Выяснилось, что восприятие головным мозгом музыки основано на иерархическом и пространственном принципах. На этих принципах построены все сенсорные системы человека. Первичная слуховая кора, получающая информацию о музыке от уха и (через таламус) от низших слуховых центров, участвует в начальных процессах восприятия музыки, например в анализе высоты звука (частоты тона) и положения его источника в пространстве. Под влиянием опыта, многократного прослушивания музыки и отдельных звуков, первичная слуховая кора может перенастраиваться — в ней увеличивается число клеток, обладающих максимальной чувствительностью к важным для человека звукам и музыкальным тонам. Это влияет на дальнейшую переработку музыкальной информации во вторичных слуховых областях коры и слуховых ассоциативных зонах, где происходит обработка и анализ более сложных музыкальных характеристик (гармонии, мелодии и ритма).

Иерархичность слуховой системы проявляется в следующем. Слуховая система состоит из цепочки центров, перерабатывающих нервные сигналы, направляющиеся из уха в высший отдел слухового анализатора — слуховую кору. Переработка отдельных звуков (например музыкальных тонов) начинается во внутреннем ухе (улитке), раскладывающем сложные звуки (издаваемые, к примеру, скрипкой) на составляющие элементарные частоты, на спектр. Затем по волокнам слухового нерва, настроенным на разную частоту, информация от улитки в виде последовательности нейронных разрядов (импульсов) поступает в головной мозг. В итоге они достигают слуховой коры в височных долях мозга, где определенная нервная клетка реагирует на звуки определенной частоты, точнее — на узкую полосу частот. Кривые частотной настройки соседних клеток перекрываются, то есть разрывы между ними отсутствуют. Таким образом на поверхности слуховой коры формируется частотная карта звуков.

Одно время исследователи считали, что клетки, настроенные на определенную частоту, «услышав» ее, всегда реагируют одинаково. Это не так. Каждая клетка мозга (определенных отделов) реагирует на конкретную высоту (частоту) звука. Когда какой-либо тон приобретает для животного (человека) особую значимость, первоначальная настройка клеток изменяется. В результате в анализе звуков участвует более обширная область мозга. Настройка клеток может меняться даже в процессе краткосрочного обучения: некоторые нейроны становятся сверхчувствительными к звукам, привлекающим внимание животных (и высшего, самого высокого животного — человека).

В 1988 году Рей Долан из Лондонского университетского колледжа провел ряд акустических экспериментов с людьми: их обучали придавать особое значение одному из предъявляемых музыкальных тонов.

Было установлено, что это вызывает у испытуемых точно такой же сдвиг частотной настройки нейронов, как и у животных. Такая нейронная перестройка может носить и долгосрочный характер. Этим можно объяснить, почему мы так быстро распознаём знакомую мелодию в шумной комнате и почему люди, страдающие потерей памяти вследствие болезни Альцгеймера и других нейродегенеративных заболеваний, способны вспоминать музыку, которую они запомнили в далеком прошлом.

Кратковременное обучение увеличивает число нейронов, реагирующих на звук, длительное обучение усиливает реакции нервных клеток и даже вызывает физические изменения в мозге. Реакции головного мозга профессиональных музыкантов существенно отличаются от реакций не-музыкантов, а некоторые области их мозга развиты чрезмерно. Гротескно. Как мышцы у бодибилдеров.

В 1998 году Христо Пантев из Мюнстерского университета в Германии установил, что, когда музыканты слушают фортепианную игру, площадь слуховых зон, реагирующих на музыку, у них на 25% больше, чем у не-музыкантов. Исследования детей также подтверждают предположение, что ранний музыкальный опыт облегчает «музыкальное» развитие мозга. В 2004 году Антуан Шахин, Ларри Робертс и Лорел Трейнор из Университета Макмастера в Онтарио регистрировали реакции головного мозга пяти-шестилетних детей на звуки фортепиано, скрипки и чистые тоны. У детей, в чьих домах постоянно звучала музыка, была выявлена более высокая активность слуховых областей мозга, чем у тех, которые были на три года старше, однако музыку слушали мало.

Исследователи изучают не только переработку мозгом «акустической» составляющей музыки, но и процессы, благодаря которым она эмоционально воздействует на людей. В одной из таких работ было показано, что физические реакции на музыку (в виде мурашек, слез, смеха) возникают у 80% взрослых людей. Согласно данным опроса, проведенного в 1995 году Яком Пэнксеппом (университет в г. Боулинг-Грин, США), 70% из нескольких сотен опрошенных сказали, что наслаждаются музыкой, «потому что она порождает эмоции и чувства».

Опыты показывают, что младенцы выявляют различия между двумя близкими по звучанию тонами не хуже взрослых. К тому же малыши замечают изменения как темпа (скорость воспроизведения) музыки, так и ритма и тональности. Кроме того, не так давно обнаружили, что двух-шестимесячные дети предпочитают интервалы консонансы диссонансам. Музыкальное образование ребенка начинается еще раньше — в материнском чреве. Может быть, и еще раньше — с музыкального воспитания родителей, — или еще раньше.

До недавнего времени механизмы таких эмоционально-физических реакций оставались для ученых загадкой. Однако исследова-

ние пациентки, страдающей двусторонним повреждением височных долей, затронувшим и области слуховой коры, подсказало ответ на мучивший ученых вопрос. Вообще, ученые часто и с удовольствием мучаются. Так вот, у пациентки сохранились нормальный интеллект и общая память, не возникало никаких трудностей с языком и речью, но музыку (старые и прежде хорошо известные ей произведения или же новые, только что прослушанные) она не узнавали. Девушка не способна была различить даже две мелодии, какими бы разными они ни были. И тем не менее у нее наблюдались нормальные эмоциональные реакции на музыку разных жанров. Она безошибочно могла отождествлять эмоции с настроением музыкального произведения. Исследователи предположили, что височные доли мозга необходимы для понимания мелодии, но не для возникновения соответствующей эмоциональной реакции, в которой участвуют как подкорковые структуры, так и лобные доли коры.

Как реагирует на благозвучные и неблагозвучные сочетания тонов головной мозг? Изображения, полученные с помощью позитронно-эмиссионной томографии во время прослушивания испытуемыми консонансов и диссонансов, показали, что в развитии эмоциональных реакций участвуют различные области. Аккорды-консонансы активизировали орбитофронтальную область коры головного мозга (часть системы вознаграждения) правого полушария, а также часть области, расположенной под мозолистым телом. Аккорды-диссонансы вызывали активизацию правой парагиппокампальной извилины. Таким образом, в развитии эмоциональных переживаний, связанных с восприятием музыки, принимают участие две различные системы мозговых структур. Ученые обратили внимание на еще один аспект, связанный с восприятием музыки. Когда они сканировали головной мозг музыкантов, блаженствовавших во время прослушивания какой-то музыки, обнаружили, что звуки вызывали активизацию тех же самых мозговых систем вознаграждения, центров удовольствия, которые активизируются и под влиянием вкусной еды, занятий сексом и приема наркотиков. Так называемые опиатные и кокаиновые центры, центры удовольствия или вознаграждения.

Теперь ученым стало абсолютно, кристально ясно и понятно, что различные аспекты восприятия музыки связаны с деятельностью многочисленных мозговых структур, одни из которых отвечают за восприятие музыки, понимание мелодии и гармонии, а другие влияют на развитие эмоциональных реакций. В основном при прослушивании музыки левое полушарие головного мозга обрабатывает ритм, а правое — мелодию и тембр. В нашем головном мозге имеются механизмы, обеспечивающие независимую обработку как вербальной (речевой), так и невербальной информации. В левом полушарии мозга расположены речевые центры, ответственные за логику собственной

речи (центр Брока) и восприятие чужой речи (центр Вернике), а в правом полушарии — центры эмоционально-образного восприятия, в том числе звуков речи и музыки, особенно интонационной информации. За восприятие музыки отвечают несколько участков мозга: стволовая часть определяет источник звуков, слуховые зоны анализируют их частоту и ищут порядок в их нагромождении. Анализом ритма и мелодии занимаются также височные доли мозга, таламус, лимбическая система и мозжечок. Конечно, мозг работает как единое целое, полушария связаны между собой множеством нервных связей, по которым идет постоянный обмен информацией, в результате чего человек и принимает решение, стоит или не стоит ему верить словам — в зависимости от того, соответствует или не соответствует их смысл интонации голоса говорящего. Стоит или не стоит слушать эту музыку.

Ученые японского Национального центра неврологии и психиатрии провели магнитно-резонансное исследование активности участков головного мозга, задействованных в восприятии музыки. Во время эксперимента 28 человек, среди которых были профессиональные музыканты, слушали запись Итальянского концерта Баха. У всех участников приборы отметили возбуждение участков мозга, расположенных в височной доле, над ушным каналом. Но у музыкантов активность отмечалась в левой височной доле, а у обычных слушателей — в правой. Магнитно-резонансное сканирование безошибочно отделило профессионалов от любителей или нелюбителей музыки.

В левой височной доле находится речевой центр мозга, отвечающий за вербальное поведение. У профессиональных музыкантов область обработки музыкальной информации совпадает (частично) с речевым участком мозга. Это может означать, что для такого человека любая мелодия звучит как «речь», состоящая из значимых элементов и обладающая собственным смыслом. Аналитическое восприятие отличает музыкантов от простых смертных, которые воспринимают музыку на уровне эмоций. Профессионал поэтому не может «просто слушать» музыку и «наслаждаться звуками», так же как обычный человек не может «просто читать» книгу, «наслаждаясь буквами». Так что «язык музыки», «музыкальный текст» — не метафоры, а точные термины, отражающие специфику мышления музыкантов и композиторов. Среди музыкантов наибольшую активность «музыкального центра» мозга проявили обладатели абсолютного слуха и люди, занимавшиеся музыкой с раннего детства.

Таким образом, наш мозг воспринимает музыку весьма хитроумно. Разными участками, разную музыку по-разному. Скорее всего, мы никогда не сможем понять до конца, как воспринимает человек музыку и как она на него влияет. Да и не нужно это, видимо. Расслабимся, просто послушаем любимую музыку.

Внутренние частоты головного мозга

Один из частых вопросов, косвенно связанный с восприятием мозгом звуковых колебаний, — вопрос о внутренних (собственных) частотах головного мозга.

В сороковые годы XX века немецкий психиатр Ганс Бергер, изучая электрическую активность головного мозга человека, обнаружил наличие в нем слабых колебаний с частотой около 10 Гц. Он назвал их *альфа-волнами*. В пятидесятые годы XX века данное открытие Бергера дало толчок возникновению и развитию раздела науки, изучающего электрические волны мозговой активности, — электроэнцефалографии.

В настоящее время выделяют следующие диапазоны собственных (внутренних) частот головного мозга (просто приведем информацию, которая есть в любом учебнике):

1) *бета-диапазон* (13–45 Гц) — фаза активного бодрствования. *Бета-волны* доминируют в мозге в обычном бодрствующем состоянии, когда мы с открытыми глазами наблюдаем окружающий мир или сосредоточены на решении какой-то текущей проблемы. Данные волны, как правило, связаны с бодрствованием, сосредоточенностью, исследовательской деятельностью и, в случае их переизбытка, с беспокойством, страхом и паникой;

2) *альфа-диапазон* (8–13 Гц) — фаза неглубокого расслабления. *альфа-волны* возникают тогда, когда мы закрываем глаза и начинаем пассивно расслабляться, не думая ни о чем. Колебания в мозге при этом замедляются, и появляются «всплески» *альфа-волн*. Если мы продолжим погружение в расслабленное состояние без фокусировки своих мыслей, такие волны начнут доминировать во всем мозге, и мы войдем в состояние приятной умиротворенности и легкой расслабленности, именуемое иначе *альфа-состоянием*. Возможно, данное состояние является нейтральным (бездеятельным) состоянием мозга. На электроэнцефалограмме здорового, не находящегося под влиянием стресса человека *альфа-волн* всегда много. Недостаток их может быть признаком беспокойства, стресса, нарушения в деятельности мозга или болезни. У людей, имеющих пониженный уровень активности *альфа-ритма*, обычно нарушается способность к полноценному отдыху;

3) *тета-диапазон* (4–8 Гц) — фаза так называемого быстрого сна, полудремы. Волны данного диапазона появляются тогда, когда спокойное бодрствование переходит в сонливость (колебания в мозге становятся более медленными и ритмичными). *Тета-состояние* называют еще «сумеречным», так как в нем человек находится между сном и бодрствованием, и длится оно всего несколько минут. Часто *тета-состояние* сопровождается видением неожиданных, сноподобных образов, яркими воспоминаниями. Такое почти неуловимое состояние

долгое время оставалось малоисследованным, поскольку было трудно зафиксировать его на более-менее продолжительный промежуток времени (большинство людей засыпают, как только в их мозге появляется сколько-нибудь заметное количество *тета-волн*). Такое состояние человека является любимым состоянием для гипнотизеров и других манипуляторов нашим сознанием;

4) *дельта-диапазон* (0,5–4 Гц) — фаза глубокого сна. *Дельта-волны* начинают доминировать, когда мы погружаемся в сон (эти волны еще медленнее, чем *тета-волны*). Большинство из нас при доминировании в мозге *дельта-волн* находится либо в сонном, либо в каком-то другом бессознательном состоянии (например, под действием наркоза).

Все внутренние частоты (точнее — полосы частот) головного мозга, амплитудно-частотные характеристики альфа- и других ритмов строго индивидуальны и находятся при этом в определенном частотном диапазоне, общем для всех людей. Если мы хотим попасть в резонанс с какими-то частотами головного мозга конкретного человека, нам придется или тщательно подбирать частоту воздействия, или брать данные о внутренних частотах, полученные от самого же пациента.

После данных исследований, работая над идеей биологической обратной связи, ученые разработали приборы, осуществляющие стимуляцию головного мозга через электрические датчики, наушники и стробоскопы. Оказалось возможным навязывание мозгу человека ритмов, характерных для разных состояний сознания: сна, бодрствования и др. С помощью современных электронных приспособлений довольно легко вызывается состояние «сверхобучения» («подпорогового программирования»). В таком состоянии человек является чрезвычайно восприимчивым к запоминанию новой информации. Однако здесь есть по крайней мере один нюанс. Если, активно воздействуя на мозг человека с помощью тех же электродов, с помощью которых у него снимали электроэнцефалограмму, явно удастся каким-то образом влиять на отдельные частоты, частотные полосы головного мозга (эта методика называется «нейробос» — *neurofeedback*), то по поводу моделирования частот головного мозга с помощью аудиозаписей, в том числе с использованием бинаурального слушания, существуют самые разные мнения.

На современном мировом рынке имеются сотни всевозможных разновидностей аудиозаписей для самостоятельного — в домашних условиях — «подпорогового программирования» (с целью более успешного изучения языков, отучения от курения, снятия стресса, избавления от лишнего веса, настройки на различные жизненные ситуации).

Однако я считаю, что к таким методикам стоит относиться крайне осторожно. Механизм и последствия подобного рода вмешательств в работу мозга на сегодняшний день слабо изучены. Одно дело погру-

жать человека в сон, совсем другое дело — активировать каким-либо образом какие-либо центры головного мозга. Это понимают и добро-совестные психиатры и наркологи. В настоящее время кодирование пациентов от приема алкоголя или наркотиков по этой методике (методика включает в себя кодирование не только с помощью аудио-сигналов, музыки, но и с помощью различных визуальных рядов) практически не используется, несмотря на относительно высокую эффективность. В случае «срыва» у пациента могут активизироваться его внутренние психологические особенности: шизоидность, аутизм и пр. Тем, кто настойчиво стремится к прослушиванию музыки, активирующей мозговую деятельность, могу порекомендовать следовать школам с тысячелетними традициями в этой области: индийской (йога) или китайской.

Музыка мозга

Мы помним, что внутренние частоты головного мозга лежат вне воспринимаемого человеком акустического диапазона. Человек не может слышать частоты ниже 20 Гц; вообще говоря, без использования объективных и/или «субъективных» гармоник он не слышит и звуки ниже 50 Гц. Вроде бы получается, что мы никак не можем с помощью акустических сигналов попадать в резонанс с ритмами головного мозга. Но, рассуждая о бинауральном слухе (то есть о том, как человек слышит звуки обоими ушами), мы убедились, что человек замечательно слышит «субъективные» гармоники звука. И самая сильная «субъективная» гармоника — разностная гармоника, получаемая за счет вычисления разницы частот звуков, поступающих в одно и другое ухо. Если в одно подается звук частотой 100 Гц, а в другое — 120 Гц, появится явственный звук частотой 20 Гц, а эти частоты близки или совпадают с внутренними частотами (полосами частот) головного мозга. Экспериментируя со звуками, так можно «попасть» в любую внутреннюю частоту, полосу частот головного мозга. Это легче всего сделать с помощью стробоскопов и других визуальных воздействий, но можно и с помощью звуков. Еще один способ выделения низких частот из звукового сигнала — использование различных модуляций, амплитудных или частотных. Вибрато или тремоло, когда чуть-чуть дрожит звук по громкости или по высоте тона.

Кто же хотел напрямую воздействовать на частоты нашего головного мозга и зачем? Предположу, что это были люди чисто гуманистической направленности, и приведу лишь несколько примеров из множества. (Но вначале небольшое замечание: хотя проводится значительное количество экспериментов, разрабатываются многочисленные методики в области «музыки мозга» (brain music), основная (если

не 100%) часть из них относится к коммерческим направлениям, а не к академической науке; а за наши (ваши) деньги нас (вас) убедят в чем угодно.)

Ученые из Университета г. Торонто (Канада) совместно с коллегами из отдела психиатрии Университетской сети здоровья в 2005 году приступили к исследованию воздействия на человека «музыки мозга». Целью их экспериментов было помочь людям, страдающим бессонницей. Для создания такой «музыки» требовалось изучить внутренние ритмы головного мозга человека, выяснить, какие ритмические рисунки и звуки способствуют релаксации и, как следствие, погружению в сон.

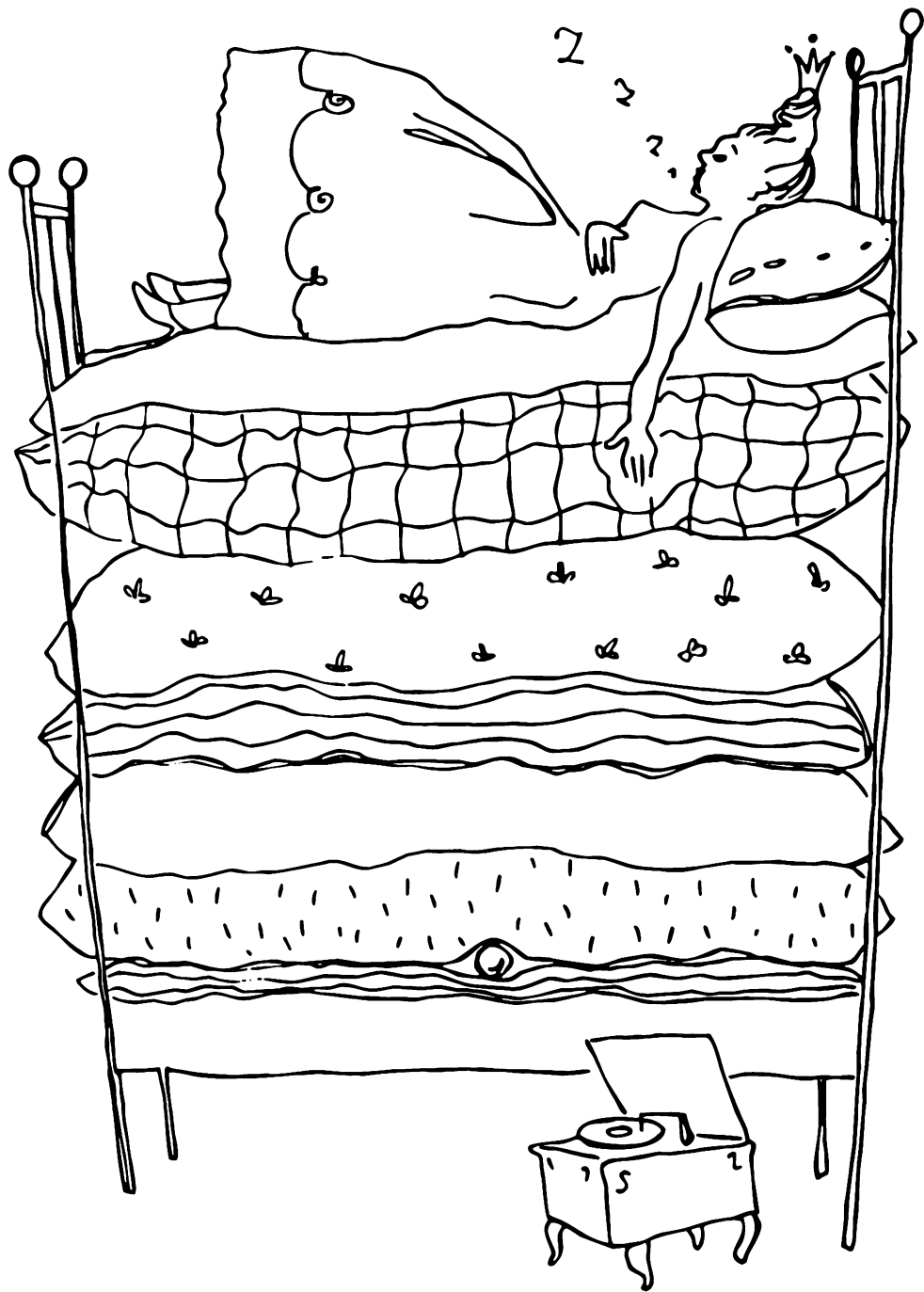
Сейчас в медицине принято считать, что «музыка мозга» — это нефармакологический метод лечения некоторых видов нарушения сна, вегетативных и тревожных расстройств, депрессий, алкоголизма, наркомании, а также метод повышения адаптивных возможностей здоровых людей. Не совсем корректное определение, но хоть какое-то. Суть метода — прослушивание пациентом (или здоровым человеком) аудиозаписи с музыкой, полученной путем преобразования электроэнцефалограммы, снятой с его собственного (!!!) головного мозга, в музыку с помощью специальных методов компьютерной обработки (амплитудного или частотного модулирования основного сигнала (музыки) информацией с электроэнцефалограммы)). Полагают, что это прослушивание способствует изменению (улучшению?) функционального состояния всего организма. «Музыка мозга» для каждого конкретного человека строго индивидуальна, поскольку составляется на основе его личных ритмов.

То, что с помощью данного метода можно воздействовать на мозг, весьма вероятно, хотя научно и не доказано. Но очень сложно предсказать долгосрочные последствия таких воздействий.

Подобные эксперименты проводились и в нашей стране, в Сомнологическом центре Минздрава РФ, клинике психиатрии им. С.С. Корсакова и других местах. Опять-таки, оценка этих экспериментов специалистами, не имеющими отношения к коммерции, а имеющими отношение к академической науке, неоднозначна. Непонятно чем воздействуем, непонятно на что воздействуем, результаты тоже не очень понятны. «Дергаем Дьявола за хвост».

Следующую историю я бы воспринимал как байку. Хотя сам и услышал ее от члена-корреспондента РАН году в 2003-м. Уважаемый человек, к тому же большой юморист, он в Звездном городке занимался экспериментами с летчиками-испытателями и космонавтами. Специальность у него была «инженерная психиатрия». Однако никаких письменных свидетельств описанных экспериментов я не видел.

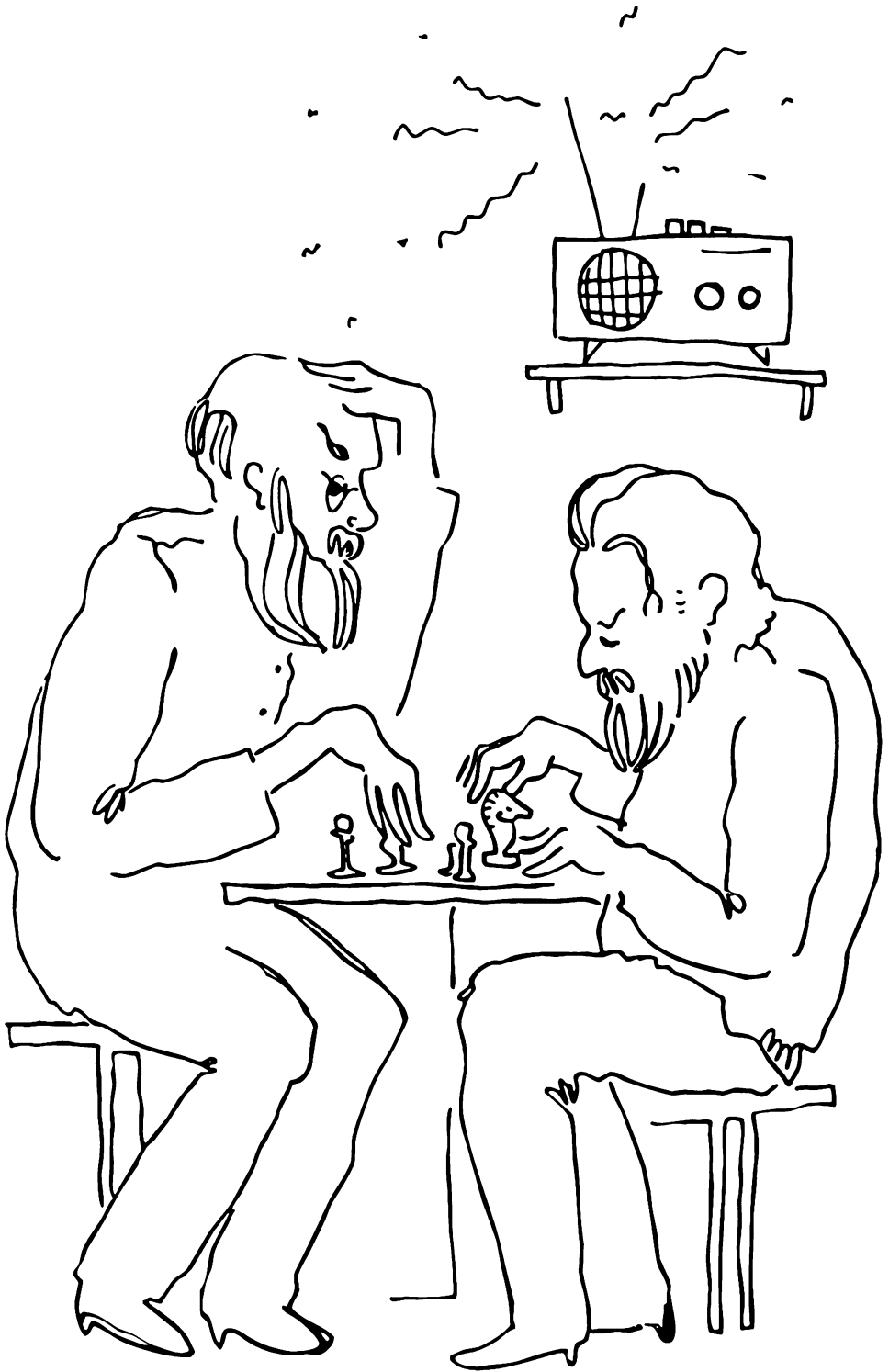
Направленность экспериментов с внутренними частотами головного мозга не всегда гуманитарная, и даже чаще всего не гуманитарная



или не совсем гуманитарная. Обширные и тщательные эксперименты такого типа в нашей стране были проведены на летчиках-испытателях и космонавтах. Летчики-испытатели, как всем известно, должны пилотировать самолеты, которые могут в любой момент развалиться; к тому же они испытывают во время полетов большую физическую нагрузку. Их специально обучают быть готовыми к нестандартным ситуациям. Но человек в любом случае нервничает перед полетом, находится в состоянии стресса, что является не самым хорошим состоянием для адекватного реагирования на внештатные ситуации. Лучше всего, если летчик-испытатель во время полета будет спокойным, адекватным, оптимистичным и наполненным энергией. Неплохо это и после полета. Например, поедая дома борщ, летчик-испытатель может шутить.

Исследователи, работавшие в области инженерной психиатрии и в других смежных областях, снимали электроэнцефалограмму у летчика в состоянии покоя и сравнивали ее с его же электроэнцефалограммой перед полетом, видели различия и начинали делать летчику психологические внушения, которые, как мы знаем, обычно приводят к прямо противоположным результатам. Принимать какие-то успокоительные таблетки перед полетом нельзя, они могут вызвать заторможенность, стимуляторы, наоборот, могут привести к излишней резкости в принятии решений. Кому-то пришла в голову гениальная мысль — почему бы не подавать в голову же ранее снятую электроэнцефалограмму. То есть сняли у спокойного человека электроэнцефалограмму, а перед полетом через те же контакты — подаем. Опыты дали прекрасные результаты — летчики приходили в уравновешенное, рабочее состояние.

Методика хорошая, но технически неудобная, так как нужно цеплять на голову множество датчиков, да и вообще все это громоздко. И тут другому гениальному человеку (фамилий мы, наверное, никогда не узнаем, потому что они засекречены, тсс...) пришла в голову идея наложить индивидуальную электроэнцефалограмму конкретного человека на музыку. Не преобразовать, а именно наложить, модулировать. Сдвигая частоты или амплитуды чуть правее или ниже, можно использовать и отдельные щелчки, короткие звуковые импульсы. Возможно модулировать любую музыку, главное — чтобы она была приятна конкретному человеку. Все это индивидуально, и на другого человека музыка, модулированная чужой электроэнцефалограммой, практически не действует. Чтобы попасть в резонанс, надо с большой точностью подбирать частоты. В зависимости от того, какого эффекта хочется достичь, можно промодулировать музыку индивидуальной электроэнцефалограммой, снятой в нужном состоянии. В частности, летчикам-испытателям давали слушать модулированную музыку, приводящую их в сконцентрированное, спокойное состояние.



Но, и мы все об этом догадываемся, спецслужбами проводились разные эксперименты. Сон, гнев, радость, покой... Слушаешь джаз и не понимаешь, что с тобой происходит, — то тебя клонит в сон, то хочется кого-то убить. Знай: это тебя кодируют. Лучше немедленно обратиться в психиатрическую лечебницу.

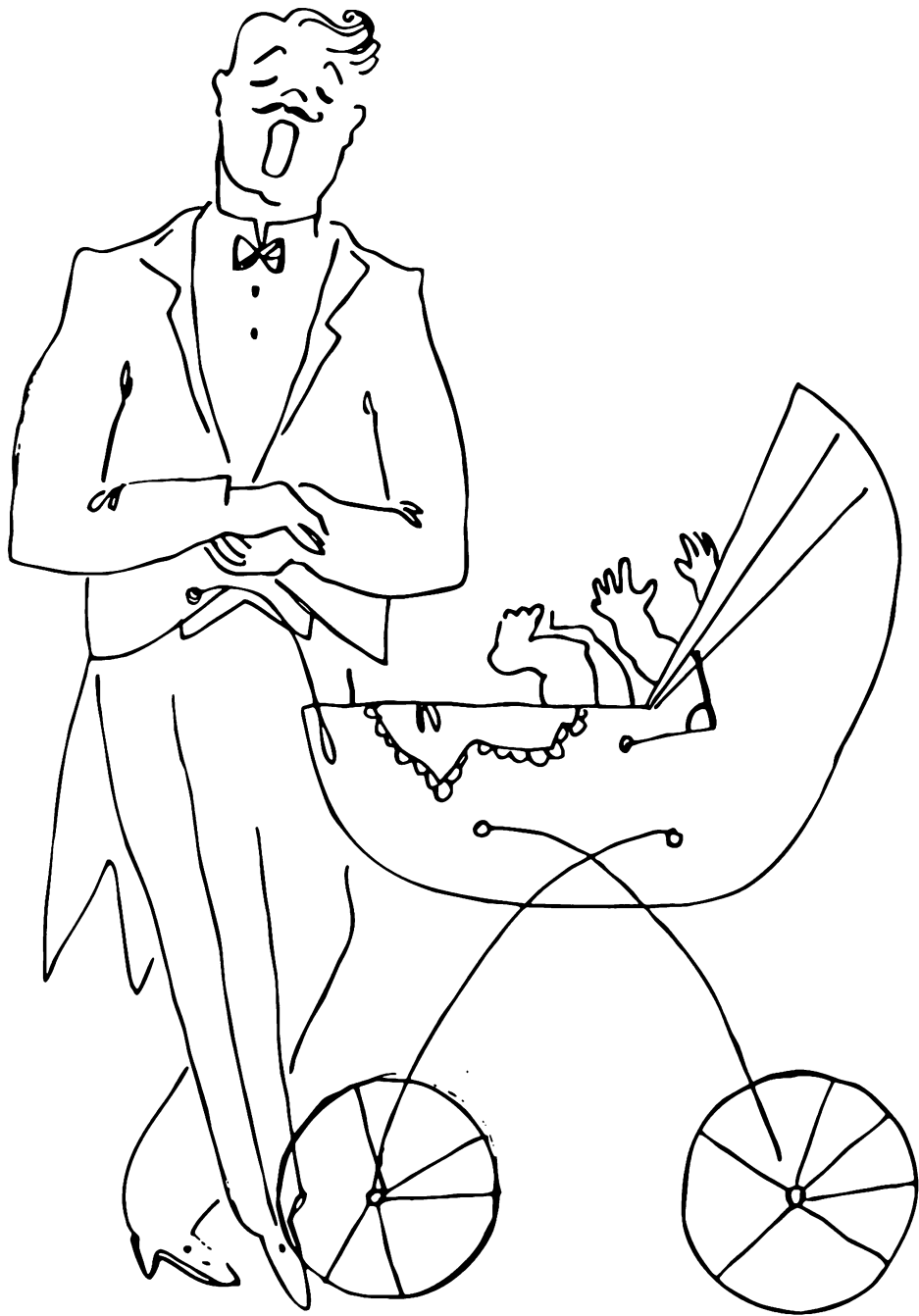
Есть еще одна особенность воздействия акустических и прочих сигналов определенной частоты — повышение гипнабельности. Если человека нужно завербовать или спровоцировать на какие-то действия, с помощью определенной фоновой музыки можно повысить степень внушаемости и доверия к собеседнику. Когда мы попросим диск-жокея поставить такую музыку в кафе — музыка будет воздействовать только на того, на кого она настроена, и ни на кого другого. Если вы чувствуете в ресторане, и даже дома, что вас кодируют, — немедленно вылейте суп на вашего собеседника и бегите в ближайшую больницу.

Вывод из всего вышеперечисленного достаточно очевиден. С помощью воздействия музыки и звука скорее всего как-то можно менять психическое состояние человека. А поскольку мозг влияет на все состояние человека, то звук может оказывать значительное воздействие, лечить или вызывать болезни, психические либо соматические. Рассуждать о том, плохо это или хорошо, все равно что говорить, полезна таблетка или не полезна. В каком-то случае полезна, а каком-то и нет. Как скальпель, которым можно делать операцию, а можно убить человека в подворотне. Вероятно, самое безопасное использование модулированной музыки в настоящее время — лечение бессонницы, если вы, конечно, верите в эффективность этой методики. Все остальное достаточно опасно.

Музыка и мозг ребенка

Раздел знаний, касающийся развития способностей ребенка, чрезвычайно большой, я коснусь его лишь частично. Очень, очень поверхностно.

Говоря о развитии человека и его мозга, можно отметить несколько очевидных фактов. Как считают современные ученые, за последние несколько десятков тысяч лет мозг человека практически не изменился. Изменились питание, количество информации, которую получает мозг в единицу времени, но сам принцип работы головного мозга не изменился. Однако потоки информации требуют другого уровня ее переработки, нежели это было тысячу лет назад. Начиная с того, что в современном мире мы получаем любую негативную или позитивную информацию из любых точек онлайн, живем в едином информационном пространстве, а раньше мы (или все же не-мы) жили в территориально и социально изолированных общинах.



Головной мозг человека, возможно, является самым сложным образованием вселенной. Он содержит около триллиона клеток, из них 100 миллиардов — нейроны, каждый из которых связан с тысячами других. Сложно представить себе такую конструкцию, даже с помощью нашего же головного мозга. Формирующиеся в процессе развития мозга межнейронные и межцентральные связи лежат в основе его интеграции, а это очень важно. Ведь у человека явно выражена специализация различных областей головного мозга. Считается, что по мере созревания мозга степень его интеграции увеличивается. Лишь при этом условии он будет способен к обучению и формированию высших психических функций. Бывает, смотришь на взрослого человека — и приходит вспышка озарения, яростное понимание: всё, сформировались у него высшие психические функции. Созрел.

Все родители хотят, чтобы их ребенок вырос умным. Соответственно, нужно как-то развивать ребенка. С этим никто и не спорит. В современной педагогической практике широко применяются методики раннего развития, интенсивного обучения еще до поступления в школу. Единственное, что хочется сказать, — развитие ребенка должно быть гармоничным. Ребенок не компьютер, он должен научиться отдыхать, иметь разнообразные интересы, получать эмоции, быть счастливым.

Ученые установили еще довольно давно, что основное развитие ребенка, становление личности и характера происходят до 7 лет. В это время закладывается интеллектуальная база, на основе которой в последующем будет развиваться умственная деятельность человека. Данный период соответствует фазе активного роста и развития мозга и межнейронных связей, синапсов. Считается, что их количество и структура связей определяют степень талантливости человека — насколько он может нелинейно мыслить, какие неожиданные ассоциации или идеи могут приходить ему в голову. Хотя в последнее время большее внимание обращают не на общее количество связей, а на их «качественную структуру», какие области мозга и как связаны между собой.

Никто не знает, как совершаются великие открытия. Но многие ученые, творческие личности говорили, что идеи, образ будущих открытий или полотен к ним приходили не после многочасовых раздумий и аналитической работы, а неосознанно, в полубессознательном состоянии, во сне. То есть можно предположить, что идеи иногда рождаются как образы, они рождаются в правом полушарии, ответственном за образное мышление. Если это утверждение является «слишком сильным», то его можно переформулировать так: идеи рождаются не только как следствие, как логическое продолжение уже существующих аксиом, теорем и лемм, они рождаются не только в левом полушарии головного мозга, — при рождении идей задействуются самые разнообразные отделы мозга, в том числе и правое полушарие.

Известно, что среди талантливых физиков, математиков уровня профессора и выше много людей, обладающих хорошим музыкальным слухом и регулярно музицирующих. При этом часто они играют очень сложную музыку. Примеров великое множество: Пифагор, Эйштейн, Фейнман... Процент аномален — более 60%. Возможно, даже 61,3%.

Вернемся к детям. Как построено обучение у детей? По данным психофизиологов, в период формирования мозга (до 7–9 лет) роль правого полушария в обучении превышает вклад левого полушария. Изучение окружающего мира для детей в возрасте до 7 лет имеет непосредственный, целостный и образный характер. К сожалению, методики преподавания, которые преобладают в школьной системе и которые часто переносятся в систему обучения дошкольников, в основном ориентированы на левополушарное, логическое восприятие. Детям говорят, что существуют некоторые правила — в языке или в математике, в жизни, где угодно. Главное — запомнить эти правила и научиться их применять. Такой подход — прямое воздействие на логику, на левое полушарие. Практически все образование на это направлено. Многие педагоги знают, что обучение дошкольников по таким методикам влечет за собой проблему мотивации — дети теряют любознательность, природный интерес к учению еще в раннем возрасте и не приобретают его в школе. Уже никогда не приобретают.

Талантливые люди — те, у кого хорошо работают оба полушария, различные области головного мозга и между ними идет интенсивный обмен. У таких людей развиты связи между разными участками мозга, между нейронами и отдельными центрами. Когда возникают эти связи? Когда человек до 7–9 лет сталкивается с различными задачами, не только логическими, но и сенсорными, эмоциональными, целостными. Музыка, к примеру, воспринимается не одним, а самыми различными областями головного мозга. При этом образуются и укрепляются разнообразные, множественные межнейронные связи. А так как практически все подобные связи образуются в возрасте до 7 лет, логично предположить: нужно, чтобы малые дети активно слушали музыку, а еще лучше, чтобы они музицировали, пели, анализировали музыку, танцевали, самостоятельно сочиняли музыку, даже самую простую. Не одновременно, конечно. При таких занятиях происходит комплексное развитие мозга. Безусловно, не только музыка ответственна за развитие правого полушария и за улучшение взаимодействия между полушариями, а любые виды искусства. Просто музыка, повторю еще раз, задействует сразу множество различных отделов головного мозга и формирует между ними устойчивые связи — что полезно.

Проводилось большое количество исследований, в результате которых выяснилось, что раннее музыкальное обучение положительно

влияет на умственную деятельность, на развитие речи, математических способностей, при этом повышается чувствительность не только звуковых, но и зрительных анализаторов, улучшается внимание.

Обратимся теперь к «скандальным вещам». Так, в 1993 году ученые Калифорнийского университета в г. Ирвине Фрэнсис Раушер и Гордон Шоу сообщили, что 10 минут прослушивания Сонаты Моцарта для двух фортепиано увеличили способность студентов колледжа решать пространственно-временные задачи, повысили их уровень IQ. В каком-то смысле этот вывод стал сенсацией и получил название «Моцарт-эффект». Долгое время результаты их исследований не обсуждались и не подвергались критике. Во-первых, это было красиво. Музыка Моцарта хорошая, приятная на слух, ничего плохого в ней нет, и слушать ее периодически наверняка полезно. Легенда была удобна для всех и была прекрасной. К сожалению, повторные эксперименты не подтвердили долгосрочного или даже краткосрочного положительного влияния музыки Моцарта. Выяснилось, что такие же замечательные результаты, как после прослушивания сонат Моцарта, студенты в состоянии показывать, если просто выспятся и отдохнут перед экзаменами.

Есть множество экспериментов, доказывающих, что от рок-музыки, в отличие от музыки Моцарта, коровы плохо доятся, пшеница не растет, а молодежь, напротив, растет, но безнравственной. Поставлю под сомнение результаты этих «экспериментов»: проводились они очень некорректно, их даже лень критиковать, настолько далеки они от нормальных научных исследований. Думается, дело было в различных уровнях громкости, ритмичности, доминирующих прямых и наведенных частотах, количестве консонансов и диссонансов. Почти не сомневаюсь, что пшеница и коровы будут себя неважно чувствовать и от музыки Вагнера, Шостаковича, Стравинского, особенно если музыку включать на большой громкости. Что никак не влияет на величие этих (и многих других) композиторов.

Мы можем верить во что угодно, вера помогает нам жить и заполняет информационные лакуны. Но! Если мы говорим о научном подходе, то это подход крайнего скептицизма. Принцип «бритвы Оккама» или «неумножения сущностей» заставляет нас трактовать все сомнения *против* результатов эксперимента и объяснять все новые явления без привлечения новых понятий и теорий. Этим научный подход отличается от описания большей части экспериментов по позитивному воздействию какой-либо музыки на рост каких-либо растений. Такое *может быть*. А может и не быть.

Итак, даже краткосрочного положительного влияния на мозг музыки Моцарта не оказала. Гораздо больший эффект (опять повторяюсь — это очень важно!) развития мозга и его способности решать различные задачки, логические или абстрактно-образные, дает обучение музыке начиная с раннего возраста.

Еще один эксперимент также получил название «Моцарт-эффект». Исследователи пришли к выводу, что дети, которые регулярно слушали музыку Моцарта в раннем детстве, впоследствии оказались более успешными по сравнению с детьми, не слушавшими музыку Моцарта. Было зафиксировано статистически значимое различие в способностях детей. «Ученые» решили, что именно музыка Моцарта полезна для развития ребенка. И, опять-таки, долгое время эти результаты не подвергались сомнению. Ведь вреда музыка Моцарта не приносила, родителям было чем заняться, а ребенок слушал красивую музыку. Но тщательные эксперименты спустя несколько лет показали, что дети, которые до 7 лет слушали Моцарта, росли в среднем в более благополучных семьях. Конечно, мы можем брать в расчет семьи, где родители украли много денег и достигли за счет этого финансового благополучия, в нашей стране зачастую так и есть. Но за рубежом, особенно в Колумбии, в целом ситуация иная: люди добиваются финансового благополучия за счет реализации и развития генетически заложенных способностей. И упорства, конечно. Дети, которым ставили слушать Моцарта, росли в благополучных семьях, их родители имели хорошее образование, IQ и EQ выше среднего уровня. То есть дети из таких семей изначально имели большую генетическую предрасположенность к более высоким показателям интеллектуального уровня и эмоциональной восприимчивости.

Хотя есть, конечно, и примеры из современной российской жизни. Осталось только понять — проявлением каких закономерностей они являются? Возможно, такие примеры говорят о том, что у некоторых детей занятия музыкой приводят и к улучшению математических способностей. Дети, обучающиеся в музыкальной школе при Московской консерватории, много времени уделяют специальности, скажем, игре на рояле, до 4–6 часов ежедневно. Им физически не хватает времени на общеобразовательные предметы. Был проведен эксперимент. Часть детей из музыкальной школы были освобождены от посещения занятий по общеобразовательным дисциплинам и сдавали экзамены по ним экстерном, в конце полугодия или года. Экзамены были сданы весьма успешно, без всяких скидок. Как выяснилось, школьную математику и физику можно выучить очень быстро.

Любая ли музыка положительно воздействует на детей? Не любая. Дети, особенно маленькие, обладают очень гибкой, нестабильной нервной системой. Им очень нравятся консонансы, благозвучные аккорды. Меня вплоть до 9–10 лет раздражали любые музыкальные диссонансы, в том числе и красивейшие доминантсептаккорды или большие мажорные септаккорды, раздражали малая и большая секунда и даже терции, нравились только кварта и квинта. Потом я полюбил септаккорды и даже более сложные сочетания звуков, но это случилось потом. Видимо, детям в период формирования мозга стоит слушать

в основном благозвучную музыку, то есть такую, где не используются резко звучащие сочетания звуков, а музыка в большой степени плавная, напевная, с приятными гармониями. Что прекрасно известно всем хорошим педагогам музыки: детей вначале обучают петь или играть простые, народные, напевные мелодии. Точнее, «простые» в кавычках, ведь «простота» эта отсеяна за многие сотни лет и является истинным бриллиантом. Но это не означает, что ребенку нужно ставить слушать или обучать его играть исключительно народную музыку. Музыка Моцарта прекрасно вписывается в данные понятия. Она тоже «простая» до гениальности; потрясающие мелодии, непонятно, может ли кто-то придумать что-либо подобное. Нужно ли запрещать детям слушать рок-музыку или «попсу»? Вот популярная музыка как раз излишне банальна и ритмизованна, вот она как раз и есть очень простая музыка, простота которой хуже воровства, как говорит хором наш народ. Хотя, конечно, и там встречаются талантливые композиторы и исполнители: Эндрю Ллойд Вебер, Элтон Джон, Стинг... Популярная музыка — это не приговор. Приговор — это плохая музыка, и она бывает любых жанров.

К классической музыке относится музыка Стравинского, Шостаковича, Вагнера. Но мне кажется, что для интеллектуального, разностороннего развития маленького ребенка такая музыка не является полезной в той же степени, что и хеви-метал или сложный джаз. Я бы не стал разделять музыку на жанры, а разделил именно на «сложную», с большим количеством диссонансов, громко звучащую, и «простую», гармоничную, как музыка Шопена, Вивальди, где ярко выражена мелодия и встречается большое количество консонансов. Одним словом, музыка, приятная на слух. Может, для взрослых людей такая музыка скучновата или излишне слащава, но это спорный вопрос: скучна ли музыка Шуберта? — все зависит от исполнителя.

2.9. «СЛУШАЕМ ПЕЧЕНЬЮ»

Мне довольно сложно писать эту главу. Во-первых, я физик по образованию, во-вторых, у меня есть и музыкальное образование, в-третьих, я много чего читал про китайскую, индийскую музыку, где музыка и медицина (читай — воздействие на органы человека) суть одно и то же, единое.

Начнем с очевидных вещей.

Если не брать во внимание человеческий мозг с его внутренними частотами, то человек — животное, бурдюк с органами, отличающимися друг от друга размерами и плотностью. Также человек наполнен жидкостями, которые куда-то текут. Еще человек непрерывно совершает (в нем происходят) различные ритмичные действия: он периодически дышит, сердце бьется.

С точки зрения физики, у органов тела человека, как и у всех материальных объектов, есть собственные резонансные колебания. Например, печень может проводить и отражать звуковые волны по трем направлениям, она может колебаться как единое целое, но волны могут бежать и по поверхности. Так что даже одному органу человеческого тела мы не можем приписать только лишь одну частоту звука, с которой он будет резонировать. Однако совершенно очевидно, что существует ряд частот, на которые печень будет откликаться, входить в резонанс с внешними звуками. Частоты эти лежат в низком частотном диапазоне, в районе 8–12 Гц.

Частоты работы других внутренних органов также лежат в этой области. Например, частота работы сердца и гладкой мускулатуры внутренних органов близка к 7 Гц; 20–30 Гц — резонанс головы; 2–3 Гц — резонанс желудка; 6–8 Гц — резонанс почек. Конечно, это лишь примерные частоты, при которых возникают резонансы с отдельными органами человека.

Чем хороши или плохи резонансы? Резонанс — резкое усиление колебаний какого-либо объекта под влиянием внешних колебаний, в нашем случае — акустических колебаний, звука. В обычной жизни человек не получает направленного воздействия резонансных частот на определенные, отдельные органы. И это хорошо, организм занимается саморегуляцией. При прослушивании классической музыки, например органной, где явно выражены низкочастотные звуки, также можно не ждать опасного воздействия низких частот на организм. Различные по высоте звуки органа чередуются и не достигают травмирующих человека уровней громкости, хотя многие отмечают, что органную музыку они слушают «животом». Другая ситуация — на больших открытых концертных площадках. Чтобы обеспечить уровень громкости, достаточный для прослушивания музыки людьми, которые находятся далеко от сцены, громкость передающих и усиливающих звук акустических систем делают очень большой, близкой к болевому порогу человека. К тому же при большой громкости лучше слышны низкие частоты звуков, особенно сильно воздействующие на человека. Кроме крайне негативного воздействия на слуховой аппарат (может развиваться частичная или полная глухота), музыка такого рода способна повредить и внутренние органы человека, сердечно-сосудистую систему, желудочно-кишечный тракт.

Некоторые современные виды музыки используют жесткие, компьютерные, синтезируемые ритмы с одинаковой частотой. Эти ритмы исполняются на большой громкости. Почему я подчеркиваю именно компьютерный, искусственный характер данных ритмов? Ответ прост: человек, каким бы он хорошим ни был, не в состоянии поддерживать абсолютно одинаковый ритм музыки, ни один барабанщик не может выдерживать постоянно один и тот же ритм. А компьютер, синтезатор — может. На слух такие ритмические конфигурации звучат про-

твоестественно, бледно и плоско, в отличие от «живых барабанщиков и перкуSSIONистов». Однако именно попадание постоянного, точного, большого по амплитуде (громкого) сигнала в резонанс с каким-либо органом человека и представляет для него (для человека и органа) самую большую опасность.

Приведу лишь два примера. Японские и нацистские «исследователи» в специальных лабораториях во время Второй мировой войны добивались разрыва аорты у испытуемых, тщательно подбирая частоту и громкость звука. В Интернете давно гуляет информация на тему «коричневого звука». Понять, «утка» это или нет, мне не удалось. Просто перескажу байку. В Японии в прошлом веке для разгона демонстраций использовался так называемый «коричневый звук». Звуки определенной частоты, издаваемые громкоговорителями, установленными на грузовиках, приводили к мгновенному опорожнению прямой кишки у демонстрантов. Люди, преисполненные до этого негодованием по поводу действий правительства, разбредались по домам на цыпочках. В настоящее время использование таких технологий разгона демонстраций запрещено.

Про воздействие на человека инфразвука (звука низкой частоты, не слышимого человеком с помощью ушей) подробно писать не буду, факты достаточно известны. При звуках определенной частоты человека охватывает необъяснимая паника, он совершает неразумные поступки, может покончить жизнь самоубийством. Применение инфразвука с целью усилить ощущение трагизма в театральных постановках (а такие эксперименты были) запрещено. Вулканам, также издающим перед извержением инфразвук, подобные запреты не помеха, а жаль.

Отдельная тема — постоянное воздействие техногенных звуков. В крупных городах нас окружает огромное количество вещей, издающих постоянный звук различной частоты и громкости. По улицам ездят машины, производя низкочастотный шум значительной интенсивности, работают трансформаторы с постоянным «гулом», в офисах работают вентиляторы компьютеров и вентиляционных систем. Весь этот техногенный, продуцированный деятельностью человека шум носит постоянный характер, человек его перестает замечать. Однако эти звуки, несомненно, негативно влияют как на слуховую систему человека, так и на его отдельные органы. Как бороться с этими воздействиями, думаю, понятно всем. Нужно стараться жить, хотя бы некоторое время (на выходных), в тех местах, где звуков почти нет. В деревне, на даче, в Альпах, Гималаях, Кордильерах. Нужно давать отдых нашим ушам и организму. Попить парного молока с деревенским самогоном и/или соседом тоже можно, для здоровья.

Короче говоря, будьте аккуратнее, люди, с громкими, длинными звуками, особенно низкой частоты. Избегайте рок-концертов, прелюбодения и гордыни. Живите скромно. Будьте счастливы, люди!

Музыка

- 3.1. Акустическое обоснование
консонансов и диссонансов
- 3.2. Музыкальный слух
- 3.3. Абсолютный музыкальный слух
- 3.4. Относительный,
или интервальный, слух
- 3.5. Внутренний слух
- 3.6. Тембральный, или
интонационный, слух
- 3.7. Полифонический
и гармонический слух
- 3.8. Способность к импровизации
- 3.9. Чувство ритма
- 3.10. Чувство музыкальной формы
- 3.11. «Цветной» слух
- 3.12. Наследование и развитие
музыкального слуха
- 3.13. Музыкальные строи



3.1. АКУСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСОНАНСОВ И ДИССОНАНСОВ

Я так много говорил о физике и анатомии, что начал забывать, что эта книга посвящена музыке. Но, рассуждая о музыкальном строе, музыкальном слухе, то есть о понятиях из области «культуры», нужно еще немного поговорить про физику и биологию, совсем чуть-чуть.

В различных музыкальных культурах звукоряды различны. В основе построения звукорядов лежит способность слуховой системы классифицировать звуки по высоте, больше нечему там лежать. Человеческое ухо способно различать звуки с разностью частот в 0,1–0,3% — с учетом зависимости от высоты, интенсивности, длительности сигнала, конечно. Это очень высокая точность. Человек может распознавать звуки по высоте с точностью, которая превышает точность распознавания градации музыкальных тонов, принятых в современной европейской музыке (равномерно темперированный 12-нотный строй), более чем в 20 раз. Правда, такие рассуждения применимы лишь при сравнении звуков с близкими тембрами, например, двух звуков скрипки. При значительно отличающихся тембрах звуков (рояль-труба, скрипка-го-лос) точность может ухудшаться в разы.

Все музыкальные шкалы (*от лат. scala* — лестница) основаны на разделении непрерывного звукоряда, непрерывной частотной звуковой шкалы на отдельные ноты с фиксированными, заданными частотами и определенными интервалами между нотами. Почему так исторически сложилось, никто не знает. Есть достаточно очевидные соображения, что дискретную, цифровую информацию мозгу удобнее и проще хранить и обрабатывать или что струн и дырочек во многих музыкальных инструментах конечное количество. Но, по-видимому, основная причина возникновения дискретных музыкальных шкал состоит в поиске максимально возможного числа консонансных (благозвучных) комбинаций между нотами звукоряда, когда две (или более) ноты звучат одновременно. Такое мнение высказал в своей книге известный психолог-акустик Хуан Г. Редерер. Соглашусь с ним.

Рассмотрим понятия «консонанс» и «диссонанс» подробнее.

Консонансы и диссонансы (благозвучное и неблагозвучное сочетание звуков)

Консонанс (от *франц.* consonance) — согласие, согласное звучание; соответственно диссонанс — несогласное, нестройное звучание. Эти понятия можно рассматривать с разных позиций. Например, с музыкально-психологических: «консонанс» ощущается как мягкое звучание, представляющееся выражением покоя, опоры, спокойствия, а «диссонанс» — как раздражающее, беспокойное, являющееся носителем напряжения и движения. Чередование консонансов и диссонансов создает «гармоническое дыхание» музыки. Вспомним древний комментарий к «И Цзин» (китайской «Книге Перемен») — «Си цы чжуань»: «Один раз инь, один раз ян — это и есть Дао (Путь)». В разных музыкальных культурах и в разные периоды времени отношение к консонансным и диссонансным интервалам было различным. Если во времена Пифагора к консонансным интервалам относили только октаву, квинту и кварту, а в XIII веке и терции перешли в разряд консонансных, то в музыке XX века уже широко используются малые интервалы, которые раньше считались резко диссонансными (например малая секунда). Использование в музыке консонансных и диссонансных интервалов определяется учением о гармонии, переменчивой наукой, зависящей от исторических традиций и текущих музыкальных вкусов.

На сегодняшний момент нет единой теории консонансов и диссонансов. Несмотря на то, что наиболее распространенной является сейчас «психоакустическая» теория, рассмотрим теории в их историческом развитии. Конечно, рассмотрим лишь очень поверхностно.

Пифагор

Пифагор жил приблизительно в VI веке до нашей эры. Был он великим человеком, описание его воззрений требует большого количества времени и места. Был он математиком, философом, музыкантом, политиком. Много кем был. Чуть более подробно я пишу о нем в своей книге «Музыкальная математика древних. Поиск гармонии».

Так вот. Проводя музыкально-математические эксперименты, Пифагор предположил, что ощущение консонансности, гармонии, появляется тогда, когда длины звучащих струн (частоты звуков) соотносятся как небольшие целые числа. Так он выделил интервал уна (соотношение частот $1/1$), октава ($2/1$), квинта ($3/2$) и кварта ($4/3$). Другие интервалы, которые мы сейчас тоже относим к консонансным: терции, сексты, Пифагор к консонансным интервалам не относил. Конечно, эту теорию консонансов нельзя отнести к полноценной естественно-научной, ведь физику звука и устройство слухового аппарата Пифагор не учитывал. Но его очень сложно в этом обвинять, физику и биологию еще никто не

придумал. Кстати, Пифагор практически всю свою жизнь, с 18ти лет до 50ти провел в обучении у жрецов древнего Египта и у мистиков Вавилона. Так, что может оказаться, что упомянутая выше теория консонанса значительно старше, чем цивилизация Древней Греции.

Теория основного тона

Теорию основного тона придумал прекрасный средневековый композитор и исследователь Жан Филипп Рамо. В средние века уже достаточно прилично были развиты естественнонаучные дисциплины и Жану Филиппу было полегче, чем Пифагору или египетским жрецам.

Жан Филипп предположил, что консонансными сочетания звуков мы считаем тогда, когда мы явно слышим так называемый «основной тон». Например, мы слышим два звука с частотой 100 и 200 Герц. Основной тон – 100 Герц. Если слышим два звука с частотами 200 и 300 Герц, то основной тон имеет высоту в 100 Герц. Его действительно хорошо слышно. Многие музыканты по основному тону даже подстраивают свои инструменты в ансамблях. Для звуков 400 и 500 Герц основным звуком будет также звук в 100 Герц, и для трезвучия 400/500/600 Герц. Но это уже чуть более сложная ситуация. Трезвучие с соотношением частот 4/5/6 – это мажорное трезвучие, например, До-Ми-Соль (с учетом темпериции строя). Объяснений здесь может быть по крайней мере два, почему это так. Во-первых, все частоты: 600, 500, 400, 300, 200 представляют собой гармоники звука с частотой 100. А гармоники свободной струны хорошо сочетаются между собой, это экспериментальный факт. Во-вторых, во внутреннем ухе человека, на базилярной мембране образуется достаточно сильный разностный тон F2-F1. В случае нашего мажорного трезвучия это именно 100 Герц. Это и первая гармоника и самый сильный разностный тон, одновременно. Поэтому и музыканты, и не-музыканты отлично его слышат.

Теория «основного тона» замечательна всем, кроме того, что она не объясняет консонансность минорного трезвучия с соотношением частот 4/4,8/6. На слух оно звучит достаточно благозвучно. Но «основного тона» здесь вычислить никак не получается. Точнее, он будет находиться так низко, что человек такой звук услышать просто не сможет.

Что же, и теория «основного баса» Жана Филиппа Рамо не совершенна. Но – очень хороша. Ее не знают басисты рок и джаз групп, при этом активнейшим образом используя.

Теория биений Гельмгольца

Гельмгольц, великий физик, акустик в XIX веке создал первую полноценную естественнонаучную теорию консонансов и диссонансов. Он заметил, что когда частоты двух звуков отличаются на 10-30 Центов, человек

испытывает сильнейшие неприятные ощущения. И действительно, если мы вспомним картинки из первой главы этой книги «Физика» где складываются синусоиды с близкими частотами, это приводит к образованию звука с частотой $(F_1 + F_2)/2$ у которого амплитуды меняются с частотой $F_2 - F_1$, то есть возникают биения, звук «плывет». И такие сочетания звуков крайне неприятны для человека, то есть диссонансны. Если обобщить вышесказанное, то диссонанс возникает тогда, когда возникают биения.

Причем, так как мы помним, что реальные музыкальные звуки состоят не только из одного тона, а и из множества дополнительных гармоник, такие биения могут возникать и между различными гармониками двух музыкальных звуков. Не обязательно между пятой и пятой. Может быть и между третьей и пятой, или между второй и третьей и так далее.

Теория Гельмгольца осуществила прорыв в акустике, в понимании того, что такое тембр, что такое консонанс и диссонанс и во многом другом. Она опиралась (и опирается) только на физические параметры звука, но и это – очень, очень много и очень, очень хорошо.

Однако, и прекрасная теория Гельмгольца не всегда хорошо согласовывалась с экспериментальными результатами. Вы и сами легко можете увидеть и услышать ее слабые места. Возьмите малую и большую секунду в среднем диапазоне рояля. Малая секунда звучит очень диссонансно, большая – чуть менее диссонансно, но все равно неблагозвучно. Теперь возьмите малую и большую секунду в верхнем диапазоне рояля. И малая и большая секунды будут звучать очень диссонансно. А в нижнем диапазоне рояля секунды звучат уже не так уж диссонансно. Этот эффект хорошо знают все приличные композиторы и музыканты, и плохо знают все неприличные композиторы и музыканты, впрочем, о них говорить вообще смысла нет.

Итак, можно предположить, что только с помощью физики объяснить явление диссонанса и консонанса не получается. Значит, нам еще нужны знания о человеке.

Теория консонансов Гарбузова Н.А., зонная теория

В Московской консерватории (в широком смысле этого слова) был организован уникальный исследовательский центр под руководством Гарбузова. В центре проведено огромное количество экспериментов, там работали выдающиеся люди и исследовали они часто людей также с выдающимися музыкальными способностями.

Результаты экспериментов, которые имеют отношение к нашей теме, достаточно просты. Человек воспринимает высоту ноты, одного или нескольких звуков не как определенное значение частоты, а в пределах определенной зоны. С точки зрения физики это очевидно. Ни один измерительный прибор не может определить частоту звука с абсолютной точностью, всегда будет какая-то погрешность. Скажем, с помощью

современного компьютерного оборудования мы можем определить, что частота этого звука 440 Герц $\pm 0,01$ Цент. А человек с абсолютным слухом определит эту ноту Ля первой октавы с точностью ± 30 Центов. Ошибка все равно будет, то есть можно говорить о зоне, в пределах которой человек (или компьютер) считает ноту Ля нотой Ля. Для разных людей и разных компьютеров эта зона различна.

То же самое происходит и с сочетанием двух звуков. Например, мы слушаем чистую квинту с соотношением частот $3/2$ (примерно До-Соль). Согласно Гарбузову, мы будем считать квинту квинтой, даже если соотношение частот будет не $3/2$, а, например, $3/2 \pm 10$ Центов. Конечно, отношение частот в центах мерить нехорошо, я говорю об отклонении высоты каждого звука от «идеальной высоты». Зона, в пределах которой человек ощущает консонансность звучания, сильно зависит от отдельного человека. Также сильно она зависит от тембров сравниваемых звуков. На одном и том же инструменте человек чувствует «фальшь» значительно лучше, чем если бы мы взяли один звук на органе, а другой на скрипочке. Ощущение отклонения интервалов от математически выверенных консонансов, как утверждает Гарбузов, выражается в изменении интонации.

По большому счету, теория Гарбузова не является полноценной научной теорией, что никак не умаляет ее достоинств, а уж тем более великого исследователя Гарбузова. В этом его теория близка к теориям Пифагора и Жана Филиппа Рамо. Экспериментальные данные есть, механизмы не ясны. Опять придется изучать самого человека.

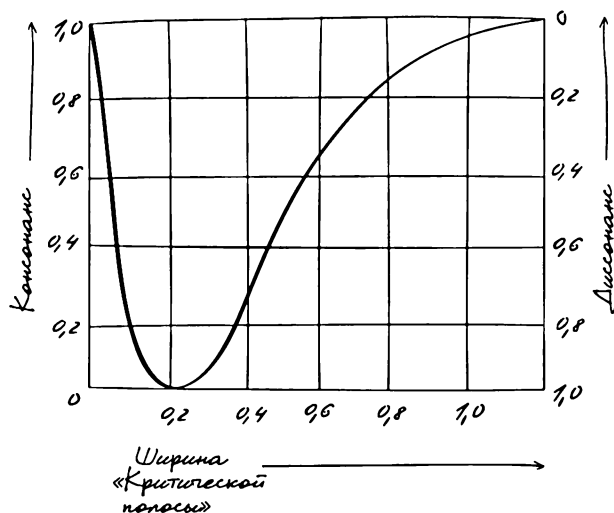
Психоакустическая теория консонансов и диссонансов

К анализу консонансов и диссонансов можно подойти и с психоакустических позиций, то есть рассмотреть, как влияют частотные соотношения между гармоническими составляющими сложных музыкальных звуков на их восприятие. Такие психоакустические отношения являются общими и зависят только от внутренних свойств слухового аппарата и не зависят от представлений разных людей о гармонии. В настоящее время «психоакустическая теория» консонансов является самой распространенной.

Ощущение диссонантности и консонантности музыкальных интервалов тесно связано с понятием «критическая полоса», то есть с предельной разрешающей способностью слуховой системы разделить и различить два отличных по высоте звука. Понятие «критическая полоса» появилось после экспериментальных исследований слуха человека. Дано ему сейчас и теоретическое объяснение, но пока явно не достаточное. В современной технике звукозаписи и передачи информации влияние «критических полос» чрезвычайно важно. Сложно качественно записывать, а особенно, передавать музыку. Ведь музыка широка и объемна, а провода узкие. Но длинные.

Когда сложный музыкальный или немзыкальный звук разделяется на спектр во внутреннем ухе, на базилярной мембране, работу базилярной мембраны можно представить в виде действия полосовых фильтров с определенной шириной. Именно ширина полосы пропускания этих фильтров и определяет ширину «критической полосы». Под «критической полосой» сейчас принято понимать следующее: «ширина полосы, внутри которой слуховые ощущения резко изменяются». Ощущения громкости и других параметров звука при попадании звуковых сигналов внутрь или вовне «критической полосы» резко различаются по частоте, по высоте. Исследования показали, что ширина «критических полос» с повышением частоты также увеличивается. Всего на базилярной мембране размещаются примерно 24 «критические полосы» с шириной, зависящей от частоты звука.

Как известно из физики, если в системе происходит сложение двух колебаний с близкими частотами, например 50 Гц и 60 Гц, то возникает режим биений. Эти биения воспринимаются на слух как пульсации громкости тона со средней частотой 0,5 (50 Гц + 60 Гц) и медленно меняющейся амплитудой с частотой (60 Гц – 50 Гц). Когда частоты совпадают, два тона звучат в унисон, если увеличивать частоту одного тона, то, вплоть до разницы 15 Гц, отчетливо прослушивается один тон с меняющейся громкостью — биения.



Зависимость степени ощущения консонантности (диссонантности) интервалов между двумя чистыми тонами в зависимости от разницы частот сигналов

Проводились эксперименты с большой группой слушателей, среди которых не было профессиональных музыкантов, так как слух музыкантов натренирован на заученные образцы консонансных и дис-

сонансных созвучий. Результаты экспериментов были обработаны, на основании этого была построена кривая, иллюстрирующая при какой разнице по частоте два чистых синусоидальных звука воспринимаются как «приятные» консонансные или как резкие либо «неприятные» диссонансные. Максимальная «приятность» звучания — консонанс — обозначена 1, диссонанс — 0.

Как видно из графика, если разница частот равна нулю, то есть два тона звучат в унисон, то это совершенный консонанс. Если разница частот больше, чем «критическая полоса», то такое созвучие тоже звучит как консонанс. Для частот, разница между которыми составляет от 5% до 50% от «критической полосы», музыкальный интервал воспринимается как диссонанс. Максимальный диссонанс ощущается, когда разница составляет одну четверть от ширины «критической полосы». Помним, что ширина эта меняется с частотой. Поэтому два тона могут звучать как консонансный интервал в одной октаве и как значительно менее консонансный (или даже диссонансный) — в другой (!). Вот мы и получили ответ на вопрос, почему теория Гельмгольца о консонансах не дает нам исчерпывающего объяснения. В нижнем диапазоне рояля секунды звучат не очень диссонансно, зато в верхнем диапазоне — чрезвычайно неприятно.

При сочинении и транспонировании музыки следует с осторожностью использовать сочетания звуков, частотная разница между которыми порядка одной четверти «критической полосы». Если, конечно, не ставить специальной задачи создать такую музыку, чтобы слушатель от нее впадал в нервное расстройство.

Вернемся к вопросу о консонантности и диссонантности музыкальных интервалов. Каждая нота, сыгранная на любом инструменте, — сложный звук, состоящий из основного тона и большого числа гармоник и обертонов. Значения частоты каждой гармоники, если частота основного тона (f), такие: $1f$, $2f$, $3f$, $4f$, $5f$, $6f$, $7f$...

Если взять, например, за основной тон ноту *до* малой октавы и отложить от нее частоты с отношением $2/1$, $3/1$, $4/1$, $5/1$, то мы получим гармонический ряд. Отношения частот гармоник друг к другу (они называются интервальными коэффициентами) также подчиняются отношению целых чисел и дают основные интервалы: $2/1$ — октава, $3/2$ — квинта, $4/3$ — кварта, $5/4$ — мажорная терция. Музыкальные интервалы между гармониками уменьшаются по мере увеличения их номера: $2/1 > 3/2 > 4/3 > 5/4 > 6/5$...

Каждый музыкальный тон теоретически содержит бесконечно большое число гармоник, соответствующих числу собственных частот колебаний струны. Однако амплитуды их уменьшаются с ростом частоты, и начиная с какой-то гармоники они практически становятся неслышимыми. Например, для ноты *ля* 1-й октавы в слышимый диапазон попадает $16 \text{ кГц} / 440 \text{ Гц} = 36$ гармоник. Если эту ноту сыграть на октаву выше, то в слышимом диапазоне остается 18 гармоник.

Для многих инструментов в силу механической природы их звучащего тела имеются акустические пределы воспроизведения гармоник. У большинства акустических инструментов верхний частотный предел лежит около верхнего диапазона слуха взрослого человека 16 кГц. Современные синтезаторы могут создавать сколь угодно большое число гармоник, но отнюдь не все получающиеся звуки можно слышать без чувства негодования.

Главное влияние на оценку высоты тона оказывают первые 7–8 «развернутых» гармоник, еще 8–9 гармоник несут дополнительную информацию как для оценки высоты, так и для оценки тембра звучания, то есть наиболее значимыми для слуха являются первые 15–17 гармоник.

Основываясь на данных рассуждениях, можем перейти к вопросу определения степени консонантности различных интервалов и музыкальных аккордов сложных музыкальных тонов, содержащих в спектре большое количество гармоник и обертонов.

Биения могут возникать как между фундаментальными частотами различных тонов, так и между их гармониками. Можно количественно оценить степень консонантности (диссонантности) отдельных музыкальных интервалов. Как писал в свое время акустический гурзу Гельмгольц: «Нет чистых диссонансов и консонансов, мы можем говорить лишь о степени диссонантности отдельных интервалов и созвучий». На то он и гурзу, чтобы говорить правильные вещи.

В таблице рассмотрены два тона, отношение фундаментальных частот которых равно 3/2 (квинта), верхняя частота 330 Гц (ре 1-й октавы).

Первые семь гармоник нижнего тона, Гц	220	440	660	880	1100	1320	1540
Гармоника верхнего тона, Гц		330	660		990	1320	1650
Разница между частотами двух соседних гармоник, Гц		110	0		110	0	110
Средняя частота между гармониками, Гц		385	унисон		1045	унисон	1595
Ширина «критической полосы», Гц		65			133		193,5
Половина ширины «критической полосы», Гц		32,5			66,5		96,7
Степень консонантности/ диссонантности (C, c, D, d)		c	C		d	C	d

Методика оценки степени консонанса (диссонанса) интервала основана здесь на сравнении разницы частот двух соседних гармоник с шириной «критической полосы», соответствующей средней частоте между ними:

а) если две гармоники имеют равные частоты или различие между ними меньше 5% от ширины «критической полосы», то они обозначаются как совершенный консонанс — C;

б) если разница между двумя гармониками по частоте больше ширины «критической полосы», то это несовершенный консонанс — с;

в) если разница между частотами ближайших гармоник меньше ширины «критической полосы», то это диссонанс — d;

г) если эта разница меньше половины ширины «критической полосы», то это совершенный диссонанс — D;

д) если частотная разница между большинством гармоник двух тонов больше ширины «критической полосы» или ее половины, то такое созвучие будет восприниматься как консонанс, поэтому, например, кварта относится к консонансным интервалам.

Если же провести аналогичные вычисления, скажем, для большой терции с соотношением частот 5:4, то можно увидеть, что этот интервал следует отнести к диссонансным.

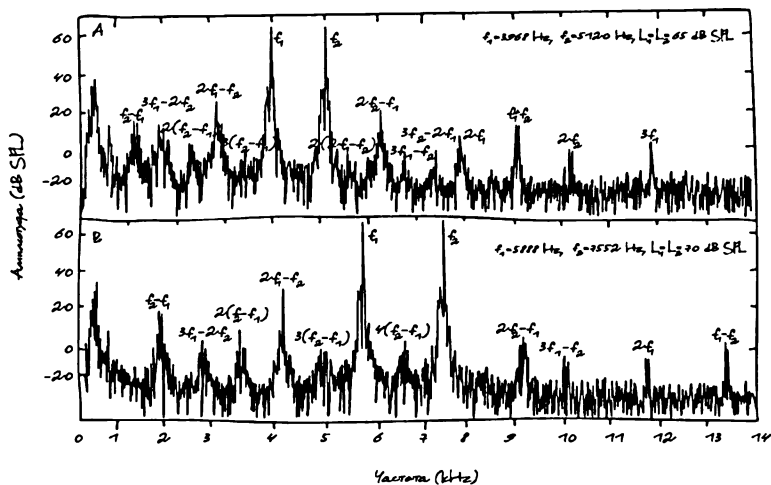
Один и тот же интервал или аккорд будет восприниматься как более или менее консонансный (диссонансный) в зависимости от того, в каком месте частотной шкалы он находится (так как ширина «критической полосы» частотно зависима!). Как следует из практики и подтверждается описанной выше методикой определения благозвучности интервалов, уменьшающиеся интервалы между высокими гармониками (7/8, 8/9 и др.) звучат более диссонансно, чем интервалы между первыми гармониками (1/2, 2/3, 3/4 и др.).

Таким образом, способность слуховой системы воспринимать определенные сочетания звуков как благозвучные (консонансные) или раздражающие (диссонансные) связана с конечной разрешающей способностью слухового аппарата человека и является ее внутренним, фундаментальным свойством.

***Теория консонансов на основе комбинационных тонов,
Стефанович М. А.***

Безусловно, со времени нобелевского лауреата Дьорда фон Бекеша психоакустика прыгала по научному полю семимильными шагами. Достижения психоакустиков сложно отрицать, на сегодняшний день это самая развитое научное направление в области восприятия речи и музыки. Однако, даже и в области психоакустики полно неясных, не до конца исследованных вопросов. В теориях психоакустиков много эмпирики, чисто экспериментальных данных, которые никак не объясняются. Очень сложно их в этом винить. Ведь наука развивается очень быстро. А куда ей было бы развиваться если бы было все уже известно?

С моей точки зрения, основное тонкое место в теории консонанса/диссонанса психоакустиков – это почему нам приятно или неприятно сочетание звуков, попадающее в определенный отдел критической полосы? Мы знаем, что это так. Но почему неприятно то?



Одно из самых оригинальных и интересных объяснений понятий консонанса/диссонанса предложила Стефанович Маргарита Абовна. Она в Санкт-Петербурге, в институте исследования слуховой системы человека и конструирования слуховых аппаратов долгое время занималась изучением свойств внутреннего уха. С биологической, медицинской, инженерной, нейрофизиологической точки зрения. То есть имела такой опыт, которого нет ни у музыкантов, ни у физиков, ни у большинства психоакустиков. Этим ее исследования особенно ценны.

Помните, мы говорили о нелинейных свойствах нашей слуховой системы? О том, что если мы слышим звук частотой F , то одновременно мы слышим звуки $2F$, $3F$, $4F$ и т.д. Причем во входящем звуке, реально существующем в воздухе, этих гармоник нет. Поэтому то такие гармоники и называли «субъективными». Долгое время было не очень понятно где же они образуются. Где-то в ухе или же в нашем воспаленном мозге?

Аналогичная ситуация и с так называемыми «комбинационными тонами». Когда мы слышим два синусоидальных сигнала F_1 и F_2 , то мы прекрасно слышим и разностный тон $F_2 - F_1$, и многие другие тоны типа $2F_2 - F_1$, $2F_1 - F_2$, $F_1 + F_2$ и так далее. Тоже было непонятно – что это? Где они образуются? Когда они образуются? И зачем они образуются?

На рисунке вы видите реальный спектр, появляющийся на базилярной мембране при наложении двух синусоидальных сигналов F_1 и F_2 . Можно видеть, что четко проявляются комбинационные тоны не только $F_2 - F_1$, но и $2F_2 - F_1$, $3F_2 - 2F_2$ и др., что несколько противоречит обычным представлениям психоакустиков.

Чрезвычайно сложные эксперименты показали, что субъективные гармоники и комбинационные тоны физически присутствуют на базилярной мембране улитки. Удалось снять даже спектр субъективных гармоник и комбинационных тонов. Получается, что наша слуховая система не очень то может и определить – какие звуки реально нахо-

дились во внешнем пространстве, а какие появились только в слуховом аппарате, ведь информация от базилярной мембраны, кортиева органа в виде матрицы «частота-амплитуда» подается в мозг как от изначальных звуков F1 и F2, так и ото всех дополнительных звуков. Очень тяжело нашему уху и мозгу. И это мы говорим только о простых СИНУСОИДАЛЬНЫХ сигналах! Представьте какая каша там образуется при наложении двух и более РЕАЛЬНЫХ музыкальных звуков, с реальными гармониками и обертонами!

Давайте рассмотрим два сигнала: 100 Герц и 200 Герц. Октава. На базилярной мембране образуются пики, соответствующие частотам 100, 200, 300 Герц и т.д. Амплитуды их будут различны, но самих пиков не так уж и много, мозгу не так уж и сложно все это запомнить.

Теперь возьмем квинту 200 Герц и 300 Герц. Образуются субъективные гармоника 400, 600, 800, 1000, 1200...; 600, 900, 1200... Также образуются комбинационные тоны 100, 400 и так далее. Картина сложнее, чем в случае октавы, но тоже не безумно сложная. Периодически, субъективные гармоника и/или комбинационные тоны совпадают. Мозг опять тратит не так много энергии на запоминание информации.

А теперь представьте себе кашу из субъективных гармоник и комбинационных тонов, когда мы берем интервал терция или секунда. На базилярной мембране будет очень много пиков, соответствующих самым различным частотам. И это только при синусоидальных сигналах! Логично предположить, что чем меньше энергии тратит наш мозг на запоминание и обработку сочетаний звуков, тем более приятными он их считает. Так «полноценными» консонансами мы можем считать лишь Уну, Октаву, Квинту и Кварту, где сочетание субъективных гармоник и комбинационных тонов не превышает разумные (?) пределы. То есть мы полностью соглашаемся с Пифагором, который именно это и говорил две с половиной тысячи лет назад. За что ему большое человеческое спасибо.

Завершая этот краткий обзор, нужно еще раз упомянуть, что ощущение консонансности и диссонансности очень сильно зависит от тембров сравниваемых звуков. Чувствительность к отклонению от чистого консонанса на одном инструменте (скрипка, ситар, вокал) может быть чрезвычайно высокой и не превышать одного цента, что очень мало. Но при сравнении звуков с существенно различающимися тембрами, рояль-труба, голос-скрипка и т.п. (есть много экспериментальных подтверждений этому), ощущение консонанса может возникать при отклонении на 10-30 и более центов. Объяснение этому явлению еще предстоит придумать нашим или не нашим ученым.

И последнее. Прямое следствие анализа консонантности и диссонантности музыкальных интервалов находит отображение в принципах построения музыкальных строев и шкал; поговорим об этом чуть подробнее в главе «Музыкальные строи».

3.2. Музыкальный слух

Эту главу хочется написать по нескольким причинам. Во-первых, есть множество популярных заблуждений, касающихся музыкального слуха. Во-вторых, данная тема напрямую вытекает из содержания предыдущей главы. И в-третьих, что, видимо, и является истинной причиной, мне это просто интересно.

Специально для «умников и зануд» приведу определение музыкального слуха из шеститомной музыкальной энциклопедии: «*Слух музыкальный* — способность человека полноценно воспринимать музыку, необходимая предпосылка композиторской и исполнительской деятельности».

Не очень понятно, правда? Давайте разберемся.

Начнем с распространенных заблуждений. Часто говорят: у этого человека есть слух, а у этого нет. Имея в виду музыкальный слух. У всех людей (без патологий органов слуха) отличный слух от природы, очень точный и тонкий. У некоторых людей какие-то аспекты слуха развиты чуть лучше, у других — чуть хуже. Но все люди понимают речь, а основа восприятия речи — это тембральный, интонационный слух, один из самых главных и для музыкантов. Звуки «а» и «о» отличаются только тембром, обертонами, формантами. Все люди легко их различают. Также есть огромное количество людей, китайцев, скажем, которые говорят на многотоновых языках, где одно и то же слово, сказанное на разной высоте звука, обозначает совершенно разные вещи. Значит, можно допустить, что у всех китайцев, вьетнамцев и некоторых других восточных товарищей прекрасный музыкальный слух. Но европейцы не хуже китайцев! Вспомним, что сотворили с Галатеей в «Пигмалионе» Бернарда Шоу, — ничего, справилась девочка. Все люди узнают любимые мелодии, памятные им с детства. Короче говоря — все люди обладают отличным слухом, музыкальным в том числе. Просто у разных людей что-то развито лучше, что-то хуже. У меня, к примеру, приличный относительный и интонационный слух, абсолютный слух, хотя значительно менее выраженный полифонический, гармонический, с чувством ритма вообще беда. Что не мешает мне прослушивать самую разнообразную музыку, получая удовольствие, и самому музицировать.

Второе очень распространенное заблуждение: абсолютный музыкальный слух — самый лучший и идеальный. Ответственно могу сказать: это не так, часто он даже мешает. Вообще говоря, абсолютный слух — просто умение слышать музыку нотами, врожденное умение, то есть проявляющееся тогда, когда ребенок уже выучил ноты. Ну и что с того, что ты знаешь, что «Союз нерушимый республик свободных...» поется на «соль-до-соль-ля-си-ми-ми-ля...», что это тебе дает? Почти ничего.

Итак, рассмотрим отдельные виды музыкального слуха чуть более подробно.



3.3. Абсолютный музыкальный слух

Под абсолютным музыкальным слухом обычно понимают — повторю еще раз — умение (чаще всего врожденное) слышать мелодию, музыку нотами. Имеется в виду автоматическое, подсознательное восприятие мелодии в виде последовательности звуков 12-нотного равномерно темперированного строя. Человек при этом не сравнивает ноты с другими, а слышит названия нот автоматически. Здесь сразу возникает несколько вопросов. Прежде всего, что делать с человеком, который не владеет музыкальной грамотой? Или что делать с индийцами и прочими ребятами, которые играют музыку в 22-нотном нетемперированном строе? К тому же любой человек знает, что одни звуки — высокие, другие — низкие, просто некоторые умеют различать эти высоты точнее. Есть еще вопросы, касающиеся сложных звуков, с большим количеством обертонов, — как человек с абсолютным слухом определяет высоту нот?

Попробую дать ответы на эти вопросы.

Общие соображения и история

Современные исследователи полагают, что термин «абсолютный музыкальный слух» возник не ранее XIX века, возможно, его ввел в обиход немецкий музыковед и физик Г. Риман. Сам 12-нотный равномерно темперированный строй родился где-то в XVII веке. Классически его возникновение связывают со временем выхода «Хорошо темперированного клавира» И.С. Баха, что спорно.

Обычно абсолютный слух противопоставляется относительному слуху, наиболее распространенному среди музыкантов и, как считается многими, самому важному для музыкантов. То есть люди, обладающие относительным слухом, слышат правильность одной ноты только лишь относительно другой и не могут сказать, какая нота была взята, если до этого они не слышали другой, название которой они знают. Противопоставление во многом искусственное — это просто два разных вида слуха. С моей точки зрения, здесь более уместна аналогия с тембральным, интонационным слухом. Как мы сразу, автоматически определяем тембр скрипки, саксофона и рояля, так и человек с абсолютным слухом сразу слышит высоту, название ноты, автоматически.

Некоторое время назад считали, что абсолютный слух связан с памятью человека, с его способностью запоминать звуки. Сейчас эта точка зрения не очень распространена, считается, что абсолютный слух — свойство сенсорной системы, системы слуха человека. Каждый звук, слышимый человеком, раскладывается на спектр обертонов и воспринимается мозгом как двумерная матрица, с четко выделенными отдельными частотами. То есть чисто теоретически любой че-



ловек должен обладать абсолютным музыкальным слухом, ведь нервные клетки слухового аппарата, внутренние и наружные волосные клетки настроены на определенные, выделенные частоты звука, точнее — на некоторый узкий диапазон частот, полосу. Однако это не так; видимо, абсолютный слух не нужен для человека как для вида, представителя животного мира. Ему более полезно воспринимать не то, на какой основной частоте произносится звук «а» или «о», а то, с какой интонацией это говорится, как повышается и понижается голос в процессе разговора, независимо от того, говорит это женщина, старик или ребенок. То же относится и к музыке. Нам не важно, с какой ноты начинает петь музыкант, нам нужно, чтобы он пел «чисто», то есть «правильно» *относительно* первой ноты, то есть нам важен больше относительный слух.

Может сложиться мнение, что абсолютный слух вовсе и не важен для музыканта, даже вреден. Такое мнение имеет право на существование. Музыкант, у которого нет абсолютного слуха, легко исполняет мелодию начиная с любой ноты, более того — с частоты звука, которую нельзя приписать ни к какой ноте. При этом музыкант полностью сосредоточен на самой мелодии и на гармонии, ничто его не отвлекает. Человек с абсолютным слухом слышит название нот автоматически. Зачем ему это знание при исполнении ноктюрна Шопена? Незачем. Но это еще полбеды. Известно, что сейчас нота ля 1-й октавы настраивается на 440 Гц. Скрипачи часто настраивают чуть выше — примерно на 445 Гц, звук в процессе исполнения произведения «сползает», колки раскручиваются. Раньше, например во времена Страдивари, инструменты настраивали почти на полтона ниже, то есть произведения исполнялись в другой тональности! А это очень важно для скрипок! Ведь резонансные частоты дек, толщина лака тончайшим образом подбирались скрипичных дел мастерами! Как пишет великий альтист нашего времени Юрий Башмет, ему было очень сложно настроиться на исполнение музыки на инструментах Страдивари и Амати.

Во времена Моцарта ноту ля настраивали на 430 Гц. Для людей с абсолютным слухом, привыкшим к современной настройке инструментов, это все еще нота ля, которая только звучит чуть «темнее», несколько по-другому. Во времена Баха ноту ля настраивали на 415 Гц, на полтона ниже, чем сейчас. Эта разница уже очень заметна, для «абсолютчиков» это просто другая нота. Во Франции в эпоху короля Людовика XIV, при Люлли и Рамо, ля настраивали вообще на 392 Гц! Колоссальная разница! А Монтеверди в Неаполе в то же время играл свою «Коронацию Поппеи» в строе 445 Гц. А у Бибера, который служил в Зальцбурге органистом и капельмейстером и писал свой «Реквием», строй был 465 Гц. То есть, резюмируя, точной привязки ноты ля к определенной частоте звука исторически не было, в «чистом виде» нет ее и сейчас, особенно — для струнных инструментов.



Я в свое время (когда был молодым и слух у меня по объективным причинам был лучше) испытывал сильнейший дискомфорт, если рояль (или другой инструмент) был настроен на четверть тона ниже, чем нужно. Ну хоть бы на полтона! А так исполнение музыки превращалось в муку, слух возмущался, он не мог определить ноту, которую берешь. Единственный плюс абсолютного слуха проявлялся на уроках сольфеджио при написании диктантов — думать и угадывать не надо, просто записывай ноты, и всё. Но ведь в реальной жизни музыкальные диктанты почти не нужны. Вот и кажется на первый взгляд, что для музыкантов абсолютный слух бесполезен, если не вреден.

Однако, опять же, не всё так просто. С.И. Танеев пишет, что для него каждая нота имела свою «физиономию», свою индивидуальность. Это перекликается с воззрениями индийцев о том, что каждая нота имеет свою эмоцию, свой цвет. Я, например, ассоциировал каждую отдельную ноту с определенным цветом и «холодом-теплотой». Нота *до* была белой прохладной, *ре* — коричневой теплой, *ми* — лимонно-желтой горячей, *соль* — изумрудно-зеленой нейтральной температуры. То есть при прослушивании музыки возникают дополнительные образы и ощущения, которые не возникают у людей без абсолютного слуха. С годами, правда, эти ощущения ослабевают, зато добавляются новые, от прослушивания музыки в других музыкальных строях.

Особенности и характеристики абсолютного слуха

Человек воспринимает высоту звука в основном по гармоникам основного тона. Когда гармоники выходят за пределы слышимого диапазона звуков или разница их частот становится меньше «частотного полосового фильтра» соседних волосковых клеток слухового аппарата, человек перестает воспринимать точно высоту звуков. Так, начиная примерно с 5 кГц люди с абсолютным слухом не могут понять, какая нота взята на инструменте. Примерно в этом диапазоне и заканчивается клавиатура рояля, что не случайно, видимо.

Еще одной важной особенностью абсолютного слуха является его привязка к ладу, к текущей музыкальной системе, в настоящее время — к 12-нотному равномерно темперированному строю. В рамках этого строя считается, что ноты *до* 1-й и 2-й октав — одинаковые ноты, хотя их частоты отличаются ровно в 2 раза, то есть это совершенно разные ноты, просто звучащие консонансно. Часто люди с абсолютным слухом ошибаются в определении названия ноты ровно на октаву, и это говорит о том, что звук людьми (музыкантами) воспринимается не сепарированно, не отдельно, а как часть системы, музыкальной системы, лада. Можно сделать вывод, что абсолютный слух вовсе не случайно относится к музыкальным видам слуха. Вне му-

зыкальной системы, вне ладовой системы абсолютный слух не имеет смысла. Вот что пишут в музыкальной энциклопедии по поводу ладового чувства: ладовое чувство, с одной стороны, основывается на способности слуха к различению высоты, громкости, длительности звуков, с другой — суть его состоит в осмыслении, понимании и эмоциональном переживании функциональных связей между звуками, составляющими музыкальное целое (устойчивости, неустойчивости, тяготения, степеней напряженности звуков в мотиве, фразе, интонационной определенности, образно-эмоциональной характерности этих мотивов и фраз). Наверное, все это верно, но не очень понятно.

Остановимся на более понятных для меня (физика по образованию) вещах, тем более что они подтверждены экспериментально.

Часто абсолютный слух музыканта имеет четкую привязку к «своему» инструменту, к определенному тембру звучания. Скрипач может с поразительной точностью настроить без камертона свой инструмент, а определить с такой же точностью высоту ноты рояля не может.

Человек способен различать звуки (два звука), отличающиеся по высоте примерно на 1–5 центов (цент — одна сотая полутона), то есть изначально человек (ребенок) может легко различать звуки, незначительно отличающиеся по высоте. Обучение музыке формирует «жесткую слуховую шкалу», «сваливая» отличающиеся по высоте звуки к той или иной ноте 12-нотного звукоряда. Н.А. Гарбузов в своих исследованиях показал, что, как правило, человек, обладающий абсолютным музыкальным слухом, ассоциирует звук в диапазоне (в зоне) $+ \backslash -$ 15–30 центов с определенной нотой. Зона (30–60 центов, практически полтона) очень большая по сравнению с тем, как слышит разницу между двумя звуками человек с относительным слухом (1–5 центов). Звуки не обязательно должны быть взяты вместе, человек удерживает предыдущий звук мелодии в памяти достаточно долго для точного сравнения двух и более звуков, при этом работают относительный и мелодический слух.

Некоторые исследователи, например П.Н. Бережанский, отмечают принципиальное значение ладовой организации слуха. То есть человек с абсолютным или относительным слухом воспринимает ноты лишь в рамках определенной ладовой системы. В целом с таким подходом можно согласиться, хотя человек с абсолютным слухом способен получать удовольствие и от прослушивания музыки с непривычной ладовой структурой (например, индийской 22-нотной музыки) или с выделенными и явными микротоновыми интервалами (например некоторых песен группы «Doors») либо произведений (прекрасных произведений!), где вообще ладовую структуру сложно определить: фри-джаз, произведения Губайдулиной, Денисова, Кейджа. Однако нельзя отрицать, что ладовое чувство (одно из важнейших свойств музыкантов) у людей с абсолютным (+ относительным) и просто относительным слухом существенно отличается. Люди с абсолютным слухом воспитывают в се-

бе восприятие моноладотонального ступенчатого качества звука, люди с относительным слухом — полиладотональное интервальное чувство. Грубо говоря, люди только с относительным слухом учатся воспринимать музыку в любых тональностях, обращая большее внимание на то, как звучат интервалы и аккорды. Люди с абсолютным слухом могут достигать невероятной музыкальной выразительности, играя лишь в одной определенной тональности. При этом каждая отдельная нота в данной тональности будет строго индивидуальна и будет иметь свой смысл. О чем, в частности, пишет и великий индийский музыкант Ра-ви Шанкар. Он утверждает, что не всегда следует учить детей играть на инструментах в разных тональностях, иногда полезно попытаться достичь глубокого понимания каждой из нот, нюансов их взаимодействия в рамках одной тональности, лада. Тем более что у индийцев, по сравнению с европейцами, очень много нот — 22.

Безусловно, это является проблемой для преподавателей музыки в музыкальной школе: нельзя учить детей с сильно отличающимися видами слуха одинаково, это может нарушить их гармоничное развитие. Что, впрочем, относится к преподаванию вообще любых дисциплин. Выбор учителя, выбор гуру — событие, определяющее всю последующую жизнь человека, как считают индийцы.

Рассмотрим некоторые характеристики абсолютного слуха. К особенностям абсолютного слуха относятся: его относительно малая распространенность, обнаружение его в детском возрасте и практическая невозможность наблюдения фазы его формирования, существование активного и пассивного абсолютного слуха, довольно низкая звуковысотная чувствительность, привязка к конкретному строю (например 12-нотному или 22-нотному)

Статистика показывает, что в среднем обладателями абсолютного слуха являются около 1% всех людей, среди музыкантов — 6–7%. Обычно абсолютный слух считается врожденным. Его раннему проявлению мешает принципиальная полиладотональность нашего равномерно темперированного строя, то есть «в массе своей» совершенно неважно, в какой тональности будет исполнено произведение. Также влияет и то, что первые музыкальные произведения, с которыми сталкивается ребенок, являются колыбельными и исполняются без привязки к конкретной тональности. При обучении же музыке абсолютный слух сразу проявляется. Интересная особенность: абсолютный слух часто сочетается с хорошим интонационным, тембральным слухом. Многие талантливые дети с абсолютным слухом легко узнают ноты в условно музыкальных звуках: в гудке автомобиля, жужжании пчелы. Эти звуки имеют очень сложный тембр, они практически не-музыкальные.

Некоторые музыканты считают, что абсолютный слух появляется в результате развития относительного слуха, однако научного или статистического подтверждения этому нет. Можно улучшить чувстви-

тельность слухового аппарата к абсолютной высоте звуков, но автоматического, подсознательного ощущения названий нот достигнуть не удастся. У многих детей абсолютный слух остается непроявленным, пассивным, если ребенок вообще не встречал хорошо настроенных инструментов и не возился с ними или если его слух искалечили принципиально полиладотональным обучением.

При обучении детей с абсолютным слухом у них (детей) иногда возникают проблемы с формированием «интервальных представлений». Для детей с относительным слухом *до-соль* (в пределах 1-й октавы) — просто квинта, для ребенка с абсолютным слухом — сочетание ноты *до* и ноты *соль*. То есть иногда абсолютный слух тормозит развитие некоторых музыкальных способностей, хотя проблема и не является критичной для музыкантов.

Люди, обладающие абсолютным слухом, часто совершают ошибки при определении высоты звука. Ошибки бывают по крайней мере двух типов. Когда «абсолютчик» ошибается на октаву, кварту или квинту, его явно смущает привязка конкретной ноты к определенной ладотональности. Ладотональность может меняться, меняется и роль конкретной ноты в этой ладотональности. Вступают в противоречие ладовое чувство и природная чувствительность к высоте отдельных звуков. С точки зрения психоакустики, объяснить это можно путаницей в первых гармониках звука. Другой тип ошибок при определении названия ноты связан с ошибками на малую секунду, которые объясняются тем, что вначале привязка звуков к нотам (названиям нот) происходит для диатоники, «белых клавиш» (у пианистов), хроматические ноты воспринимаются как промежуточные и не имеют столь сильно выраженного отдельного чувства. Я могу подтвердить это на собственном примере: все белые ноты рояля и только одна черная — *си-бемоль* — имеют ярко выраженную индивидуальность. Остальные звуки воспринимаются как промежуточные. Хотя... *фа-диез*, *ми-бемоль*, *до-диез*... Короче говоря, не всё так просто. Как интересное свойство многих «абсолютчиков»-пианистов можно отметить, что узнавание «черных клавиш» происходит раньше (иногда — гораздо раньше), чем в голову придет название ноты. Дело здесь, видимо, в привязке нот к определенному ладу, просто в голове происходит разделение на «свой/чужой».

При определении названия ноты на своем инструменте в регистре 1-й октавы люди с абсолютным слухом совершают до 15% ошибок. Очень важную роль при этом играет и привычный, «родной» тембр звуков и нот. При повышении или понижении высоты звука либо при использовании звуков непривычных тембров процент ошибок возрастает.

В среднем «абсолютчики» верно определяют автоматически 60–70% звуков, нот. Однако эти значения у разных исследователей отличаются; дело видимо, в том, что людей с абсолютным слухом немного и они находятся в разной стадии развития своего слуха. Можно вос-

питать с помощью длительных тренировок способность определять название ноты без привязки к другим, известным заранее нотам, без «внутреннего пропевания», особенно если тренировки происходят с использованием лишь одного инструмента. Но при этом время определения названия каждой ноты будет 5–15 секунд и более и точность определения будет 30–80%. «Абсолютчики» же определяют название ноты в среднем за 0,4–0,7 секунды: название ноты как бы всплывает в голове без всякой аналитики.

Повторюсь — абсолютный слух не является «самым лучшим слухом». При обучении сольфеджио «абсолютчики» могут так же плохо слышать интервалы, чувствовать гармонии и иметь проблемы с полифонией, как и все прочие люди. С другой стороны, выдающиеся композиторы и музыканты, как правило, обладают абсолютным слухом — хотя это правило и не абсолютно.

Практика показывает, что люди с абсолютным слухом имеют и приличный интонационный, тембральный слух. Возможно, это связано с тем, что у «абсолютчиков» реализована принципиальная возможность слухового аппарата человека слышать абсолютную высоту звука, повышена чувствительность восприятия отдельных частот звука волосяными клетками и, как следствие, усилена способность к восприятию совокупности отдельных частот, обертонов, тембра звука. А ведь именно эта особенность и называется тембральным, или интонационным, слухом, который очень важен для музыканта. Абсолютный слух не способствует развитию мелодического и относительного слуха, но, при правильной организации обучения, и не мешает. Мелодия для «абсолютчиков» состоит не из интервалов, а из отдельных нот. Те же замечания можно отнести и к полифоническому и гармоническому слуху. «Абсолютчики» аккорды воспринимают состоящими из нот, а не из интервалов.

При прослушивании импрессионистской музыки или непривычной уху музыки (например индийской) она воспринимается целостно, не аналитически, возникают разные эмоции, краски и другие чувства, но логический блок практически не работает. У некоторых музыкантов, детей это выражается, в частности, в том, что после концерта правое ухо становится красным и горячим, левое остается прежним по форме, содержанию и температуре. Если же на занятиях по сольфеджио или гармонии детям дают задание написать диктант или проанализировать последовательность аккордов, гармоний, то это является чисто логической задачей для обладателей абсолютного слуха, такой же, как решение уравнения или задачи по физике; правое полушарие при этом практически не работает, работает левое полушарие, логический блок. И если долго решать задачки по математике (на экзаменах, олимпиадах) или музыкальной гармонии, тогда у математиков, музыкантов начинает «гореть» левое ухо, правое остается прежним. Выглядит это довольно забавно.

Но мы взяли полярные варианты. У «абсолютчиков» при прослушивании музыки разных жанров и стилей (и у других людей, но у «абсолютчиков», возможно, это более выражено) происходит интенсивный обмен информацией между правым и левым полушариями мозга. Музыка воспринимается частично логически, частично целостно, как единый образ. Это не мешает восприятию, если научиться отключать то или иное полушарие, различные отделы головного мозга, зато дает новые краски при прослушивании музыки. Конечно же, мы все, особенно те, кто имеет высшее образование, знаем, что не властны над нашим разумом. Мы не умеем, к примеру не думать, мы всегда думаем. Только вот попробуйте объяснить эту замечательную теорию тем, кто умеет управлять своим разумом, например йогинам седьмого уровня. Они вам скажут: «Не печалься, мой друг, все пройдет. Послушай музыку внутри себя или поспи».

3.4. Относительный, или интервальный, слух

Относительный слух — подвид музыкального слуха, когда человек может «правильно» определить отношения между различными нотами мелодии или аккорда. Ноты мелодии воспринимаются не сами по себе, а по отношению друг к другу. Первая нота, тональность мелодии, музыкального произведения могут быть произвольными.

Относительный слух чаще всего называют просто «музыкальным слухом». Человек слышит, что кто-то поет или играет нечисто, фальшиво, и испытывает дискомфорт. Испытывает ли он счастье или дискомфорт от прослушивания музыки, сыгранной или пропеты чистотой, зависит совсем от других вещей: таланта композитора или исполнителя, тембра голоса или инструмента. То есть относительный слух является как бы первичным фильтром, отсеивающим неправильные музыкальные звуки от правильных.

Практически все музыканты обладают хорошим относительным слухом. Иногда он в большей степени является внутренним, то есть человек хорошо слышит «правильность» взятия нот, но сам чисто сыграть или спеть ноты затрудняется. Но это уже имеет прямое отношение не к относительному слуху, а к постановке голоса или к исполнительскому мастерству, которые развиваются в процессе многолетних занятий под присмотром педагога.

Когда мы говорим о хорошем относительном слухе, проявляется, видимо, та же ситуация, что и с абсолютным слухом: скорее всего, любого человека со здоровым слуховым аппаратом можно научить определять отношения между звуками, нотами с большой точностью, однако делать он это будет медленно. У человека же с хорошим «природным» относительным слухом все происходит автоматически, что позволяет ему наслаждаться музыкой, а не мучительно ее анализировать.



Наш слуховой аппарат построен по принципу анализа гармоник (и обертонов) звуков. Соответственно, понятия «консонанс» (благозвучное звучание) и «диссонанс» (неблагозвучное звучание) являются глубоко внутренне обусловленными строением слуховой системы. Самые чистые консонансы — те, что возникают между гармониками свободно звучащей струны. Октава — 2-я и 1-я гармоники, квинта — 3-я и 2-я гармоники и т.д. Конечно, в реальной ситуации на консонанс и диссонанс интервала или аккорда влияют тембр звука, соотношения между высшими гармониками звуков. Так как относительный слух человека лучше всего реагирует и точнее всего определяет чистые интервалы, обладателям хорошего относительного слуха подходят музыкальные строи, где такие интервалы есть в явном виде: индийский музыкальный строй, китайский, пифагорейский, арабский, натуральный, чистый.

Многие музыканты с удивительной точностью чувствуют чистые и темперированные интервалы. Например, великому пианисту Владимиру Горовицу инструмент настраивал всегда один и тот же человек, и настраивал не совсем обычным, а точнее, совсем не обычным образом. Если вслушиваться в последние записи Горовица, которые уже делались в идеальных студийных условиях «Deutsche Grammophon», проявляются очень интересные вещи: его инструмент как будто бы искусственным образом обогащается какой-то реверберацией, а часть интервалов звучит удивительно чисто. Этот эффект достигался прежде всего настройщиком Горовица. Когда он настраивал инструмент, то слегка его «растраивал», точнее — «расстраивал» лишь по отношению к современному «нечистому» 12-нотному равномерно темперированному строю. В зависимости от репертуара, который Горовиц исполнял, настройщик какие-то интервалы настраивал чисто, абсолютно консонансно, по обертонам, гармоникам. Инструмент при этом звучал или божественно, или невыносимо фальшиво. Здесь уже все зависело от исполнителя и репертуара, а с исполнителем, с Горовицем, настройщику повезло.

Обучение музыке в европейской традиции (и тут я полностью поддерживаю прекрасного исследователя музыки и композитора С.М. Майкопара) иногда плохо или губительно сказывается на хорошем от природы относительном слухе ребенка. Помню, когда я начинал обучаться музыке, учительница говорила, что есть благозвучные, а есть неблагозвучные интервалы. Также она говорила, что, слушая октаву и квинту, я должен услышать пустоту, гармонию. А я не слышал! Октава еще худо-бедно звучала благозвучно, но в звуках квинты слышались биения, колебания и неустойчивость. Кварта и терции вообще звучали фальшиво. Музыкальные интервалы брались на рояле. Потом мое ухо привыкло, я не хотел выглядеть белой вороной и стал, как и все, считать эти интервалы, взятые на рояле, чистыми, консонансными. Вспомним изречение Лао Цзы: «Человек рождается мягким, а умирает твердым». Имеется в виду, что у ребенка нет границ и барьеров, он не знает, «как

надо», «как принято», а взрослый человек переполнен «правильными правилами», «точными знаниями» и от этого становится «твердым», «негибким», неадекватным быстро меняющемуся миру. И умирает как старое, засохшее дерево, давая возможность развиваться молодой поросли. Примерно об этом писал в своей книге «Музыкальный слух» и Майкопар. Он утверждал, что при обучении детей сольфеджио на рояле у них формируется неправильное представление о чистых интервалах, чистых интонациях. Слух ребенка противится утверждению взрослых, что квинта *до-соль* на рояле — чистый интервал, но «авторитет» взрослых побеждает. На рояле вообще невозможно взять чисто квинту или кварту. На скрипке — возможно, и сами скрипачи стараются брать чистые интервалы тогда, когда играют отдельно от инструментов с фиксированной величиной ноты. Еще одним аргументом использования скрипки для обучения сольфеджио Майкопар считал то, что тембр звука рояля с затуханием звука сильно меняется, у скрипки же можно звук тянуть любое время без изменения тембра. А тембр звука весьма влияет на ощущения консонантности и диссонантности.

То есть развивать даже хороший от природы относительный слух следует аккуратно. Отношения звуков, интервалы и аккорды нужно слушать только на хорошо настроенных инструментах, в идеале — на струнных, без порошков, ладов. Иначе относительный слух, хороший и точный от природы, «размажется», станет более грубым. Воспринимать с помощью такого слуха новую, непривычную, но «математически идеальную» музыку, типа китайской, индийской, пифагорейской или сыгранной в «чистом музыкальном строе», будет тяжело.

Человек произошел от обезьяны не затем, чтобы слушать в машине «Радио Шансон». Он произошел для того, чтобы слушать Гидона Кремера или Юрия Башмета в Большом зале Московской консерватории. А также — плодиться и размножаться, но лучше это делать уже в другом месте.

3.5. Внутренний слух

Внутренний слух — возможность получать практически такое же (если не большее) удовольствие от пропевания про себя музыки, как если бы мы слушали эту музыку «живьем».

Внутренний слух, безусловно, полезен. Сложно сказать, что определяет наличие хорошего внутреннего слуха у человека, видимо — хороший относительный и интонационный слух, хорошая музыкальная память.

Майкопар описывает интересный случай. Студент готовился к выпускному экзамену в Московской консерватории. Ознакомившись с огромным количеством произведений, которые он должен был сыграть

на экзамене, заболел и не мог в течение двух месяцев подходить к роялю. И вот в течение двух месяцев он проговаривал, проигрывал у себя в голове сложные музыкальные произведения, только лишь глядя на ноты. В результате он не только выучил эти произведения наизусть, но и научился правильно интонировать. Когда за две недели до экзамена врачи все же разрешили ему подойти к роялю, он поразил своего педагога, блестяще сыграв все нужные произведения. Такой опыт положительно повлиял и на дальнейшее музыкальное развитие студента. Воистину: «Все, что нас не убивает, делает нас сильнее».

Однако внутренний слух и любой другой вид слуха по отдельности не гарантируют высокого качества исполнения музыкальных произведений. Например, один из популярных сейчас пианистов обладает потрясающей исполнительской техникой, прекрасной музыкальной памятью, хорошим внутренним слухом — но играет как музыкальный автомат, механистично и противно, особенно джаз.

Композиторы зачастую могут сочинять музыку у себя в голове, даже сложную, симфоническую, многоинструментальную. Потом нужно лишь записать ее в виде нот. Вспомните историю о Моцарте, который взял аванс за написание пьесы, успешно пропил его и забыл про обещание. Когда же его отловил заказчик и строго спросил: «Куда ты девал мою пьесу?», Моцарт ответил, что забыл ноты дома, но всё помнит, и с ходу написал прямо в конторе заказчика пьесу, используя лишь перо, чернила, пустые нотные листы и свою гениальную голову.

Нередко люди неосознанно сочиняют и поют музыку про себя. Иногда записывают ее, иногда она пропадает и остается никому не известной. Мозг человека и его внутренний слух — очень удобный музыкальный инструмент. Когда я учился музыке, мне дали задание написать небольшой канон, то есть пьесу, где одна и та же музыкальная тема повторяется в разных тональностях, накладываясь друг на друга. Несмотря на кажущуюся простоту, это непростая музыкально-математическая задача. Так вот, на рояле мне никак не удавалось придумать мелодию, мешали ноты и пальцы. А на уроке математики вдруг пришла в голову мелодия, которую я легко наложил саму на себя с некоторым сдвигом и проиграл в голове несколько раз. Осталась малость — записать ее нотами. Конечно, это несравнимо по сложности с примером про Моцарта, хотя принцип использования внутреннего слуха, как мне кажется, един.

Пожилые люди продолжают получать удовольствие от музыки благодаря внутреннему слуху и музыкальной памяти. Верхние слышимые человеком частоты снижаются к семидесяти годам до 7–10 кГц. Слышимый тембр звука сильно обедняется. Однако в памяти остаются образы старых, богатых звуков музыкальных инструментов, которые подставляются в голове вместо слышимых новых звуков. Трудности у пожилых людей возникают тогда, когда они слушают незнакомые

инструменты или должны разделять сложные сочетания звуков по тембру — например, выделять голос переводчика на фоне оригинального текста в дублированных фильмах или выделять голос собеседника в шумном ресторане («эффект вечеринки»).

Также внутренний слух мешает композитору слушать собственные музыкальные произведения. Музыканты не знают, как должно звучать произведение, а композитор знает, но объяснить не может. Так образуются переломы рук и ног у первых скрипок и солистов, если дирижером выступает сам автор музыки.

3.6. ТЕМБРАЛЬНЫЙ, ИЛИ ИНТОНАЦИОННЫЙ, СЛУХ

Тембральный, или, как его называют иначе, интонационный, слух, на мой взгляд, является самым важным среди всех видов слуха. По крайней мере, не менее важным, чем относительный слух, который считается основным для музыкантов.

Когда человек слышит музыкальный (или не-музыкальный) звук, слуховой аппарат раскладывает его на множество гармоник, обертонов, определяя высоты этих гармоник и обертонов с поразительной точностью как по частоте, так и по амплитуде. Вместо одной ноты *до* (одной частоты) в мозг человека поступает информация о 15–20 и более гармониках, призвуках в виде двумерной матрицы (частота-амплитуда). Правда, эта матрица не статична, а меняется со временем. Динамика изменения тембра, его временная структура не менее важны для нас, нежели просто соотношение гармоник в стационарной фазе звука. Тембр музыкальных инструментов наше ухо определяет в основном по фазе атаки звука, то есть по первой стадии, стадии нарастания звука. Вот эта способность воспринимать и запоминать спектры звука (разложение звука в виде двоичной матрицы частота-амплитуда) и называется тембральным слухом. А звуки, одинаковые по высоте, но с разным набором высших гармоник, отличаются именно тембром.

Зачем человеку нужно воспринимать и запоминать такое количество высших гармоник и обертонов звука, науке неизвестно, по крайней мере — современной науке.

Биология нас учит, что все органы, которые есть у животных и у человека, появились и совершенствовались в результате естественного отбора. То есть в результате мутаций случайно образовался подвид обезьяны с отстоящим большим пальцем — и мир получил почти человека: палку стало держать удобнее, плов есть сподручнее. Потом у этой обезьяны появился большой головной мозг, начали развиваться первая, вторая сигнальные системы, начала образовываться речь. Логично было бы предположить, что слуховая система развивалась так, чтобы человек мог наилучшим образом воспринимать речь других, поскольку



речь — очень важное конкурентное преимущество человека по сравнению с попугаями и прочими обезьянами. Ан нет! Для восприятия речи достаточно распознавать только 2–3 первые гармоники, формантные группы. Человек же слышит и распознает 15–20 гармоник, в зависимости от высоты звука. Зачем так хитро поступила природа? Ведь это очень сильная нагрузка на мозг, потоковая обработка таких больших матриц. Природа (или Бог, как кому удобнее) ничего зря не делает.

Эту главу я писал, находясь в Индии, в деревне-школе йогов. Так вот, йоги, пожалуй, единственные, кто говорит на этот счет что-то внятное, хотя и совершенно ненаучное (?). Человек способен слышать много гармоник звука, но они ему в обычной жизни не нужны. Однако человек может изменить свою обычную жизнь, пытаясь усовершенствовать тело и дух, занимаясь, например, йогой или цигун либо еще чем-нибудь. При этом чувствительность тела резко возрастает, как и возможность анализировать чувственную, сенсорную информацию, свои мысли и подсознание, что обычному европейцу не под силу. Обостряется способность воспринимать звуковую информацию, особенно — тембр звука. Для йогов здесь никаких вопросов нет: обостряя свое восприятие, они переходят от возможности слышать «проявленную музыку» к «непроявленной музыке». То есть потенциальная возможность использовать наш слуховой аппарат не на 5–10%, как сейчас, а на 80–90%, существует, это заложено природой, — но не менять же человека физически и функционально, если он решил заняться йогой, скажем, и постичь ранее не постигнутое?! Вот и дремлет в каждом человеке большая потенция, в органах слуха заложенная, так же как и во всех органах и, вероятно, в системе в целом. Думается, Бог нас создал «на вырост».

Почему я считаю, что интонационный слух очень важен для музыканта? Возьмем, к примеру, пианиста. Оставим в покое тот факт, что слух его подпорчен равномерно темперированным строем, пусть. Пианисту не нужно настраивать рояль каждый раз, когда он садится за него. Ему не нужно, как скрипачам, каждый раз понимать — какую ноту он берет и как ее взять. Ему нужно запомнить, что если в нотах написана $do\ 1/16$, то нужно нажать на эту клавишу и держать ее столько, сколько написано в нотах. Этому, как показывает практика, можно научить и обезьяну, и музыкальный автомат.

Известен пример великого физика Роберта Вуда. Был он человеком неординарным и чрезвычайно упорным. Лет в пятьдесят, когда у него появилось время, он купил себе большой белый рояль и самостоятельно разучил концерт Листа. В ноты он попадал, играл в нужном темпе, где надо — делал крещендо-диминуэндо. Но, по отзывам современников, играл он настолько ужасно, что хотелось выпрыгнуть из окна уже после первых пяти минут исполнения. Чем же плохо было его исполнение? Тембром. Тембром звуков. Возможно, хромал ритм, еще что-то, но это



можно простить. Неправильный тембр, интонацию — нет. Что делает педагог, когда говорит, что такой звук нужно брать так-то (рука ложечкой), такой — так-то (кисть расслаблена, ниже клавиш) и т.д.? Может быть, конечно, педагог заботится о том, чтобы у ученика не отвалилась рука, — возможно. Но прежде всего он заботится о правильной интонации, правильном тембре звука. Ведь ноту пианист берет одну и ту же, меняется то, *как* он ее берет! Можно запомнить всё, если у тебя нет слуха, и оттарабанить весело сонату Бетховена тоже можно. Невозможно без наличия тембрального слуха запомнить правильную интонацию, которая и делает исполнение гениальным или бездарным. Тот же Святослав Рихтер умел играть так, что когда он переходил от исполнения одной вещи на рояле к другой, людям казалось, будто он пересел за другой инструмент, такое тонкое чувство интонации, тембра у него было.

Оставим в покое музыку. Все знают, что одна и та же информация, сказанная разными людьми, воспринимается совершенно по-разному. Абстрагируемся от мимики и бэкграунда. Положим, мы слушаем запись выступления. У одного — доверительная интонация, ему хочется верить. У другого — фальшивая, лживая. Его слова отторгаются, хоть бы он и Канта или Ленина читал вслух. Врет он, и всё.

В Индии в школах брахманов учеников обучают чтению текстов с правильной интонацией. Учат долго, лет десять и больше. Зачем, спрашивается? Слова-то выучить просто! Считается, что священные тексты нужно произносить только с определенной интонацией, тембром, иначе они просто бессмысленны или даже вредны. Примерно то же происходит и при обучении пению в православных монастырях (и не только православных). То же значение придается и умению взять правильный по интонации звук на ситаре или цитре цинь, скажем. Рави Шанкар учился брать один звук на ситаре пять лет, занимаясь по 7–8 часов в день. Чему он учился? Правильной интонации, тембру.

Тембр, интонация звуков, речи очень важны. Мы уделяем этому слишком мало внимания, а зря. Хотя хорошие учителя всегда учили хорошо, и использованию тембрального слуха тоже. Только вот где найти хороших учителей? Вопрос этот во все времена был непростым.

Тембральный слух и мотивация

Кажется очевидным, что все любители музыки, меломаны обладают хорошим тембральным, интонационным слухом. Для них важно, как звучит тот или иной инструмент, как поет певица, какая акустика у помещения, — за все это отвечает интонационный слух. У меломанов любовь к музыке выражена «по определению», иначе они не были бы меломанами.

Теперь вновь — обучение музыке. Чтобы достигнуть приличных успехов в музыке (и почти во всех дисциплинах), нужно, как известно,

много трудиться, много заниматься «специальностью», много играть на своем инструменте каждый день. Когда я обучался музыке, норма для меня была установлена в 2 часа игры на фортепиано ежедневно. В специальных музыкальных школах — 4–5 часов. Я хорошо помню, что заниматься даже 2 часа в день было очень большой проблемой, и дело даже не в отсутствии времени, а в недостаточной мотивации. Хотелось играть в футбол во дворе, заниматься математикой, читать книги про охотников на тигров... На все это тоже нужно было время. Звуки же, извлекаемые мной из рояля, мне самому особого удовольствия поначалу не доставляли. Учительница музыки была мудрой женщиной, она мягко поддерживала мою мотивацию, знакомя меня с произведениями прекрасных музыкантов и композиторов, брала на интересные концерты, включая джазовые, что было не частым событием в то время. Так или иначе, она способствовала тому, чтобы я полюбил сам звук, само звучание, все бесконечные краски музыки. А за это ответственен в первую очередь тембр звучания. Это способ полюбить музыку, сложный способ. Гораздо проще разлюбить музыку. Все знают огромное количество примеров, когда человек, которого долгое время обучали музыке, потом никогда не подходил к инструменту, — как говорится, клал корочку диплома на комод родителям и уходил пить пиво во двор. Дело тут, мне кажется, в неправильной мотивации при обучении музыке.

Изошренные эксперименты на детях показали, что хороший относительный или абсолютный слух не являются для них достаточной мотивацией. Однако в музыкальные школы отбирают как раз по этим признакам. Наличие тембрального слуха при этом практически не учитывается, хотя он-то и есть основа мотивации детей при обучении их музыке. Дети с таким слухом плачут, когда их не берут учиться музыке из-за «плохого» относительного слуха или чувства ритма. Нужно отчетливо понимать, какую цель мы преследуем, обучая детей музыке. Удовлетворить амбиции родителей? Сломать характер ребенка, заставляя его часами играть на ненавистной скрипке? Привить ему отвращение к музыке на всю жизнь?

Многие известные музыканты обладали плохо выраженными некоторыми видами слуха — что не мешало быть им хорошими и великими музыкантами и композиторами. Один мой знакомый, прекрасный звукорежиссер, неплохой композитор, талантливый человек с отличным слухом (и весьма успешный в своем «цеховом окружении»), поет крайне фальшиво, что вызывает добрые издевки со стороны его друзей и недопонимание со стороны не знакомых ему товарищей. Так что...

Леонард Бернштейн пишет:

Удовольствие — вот Икс уравнения, что пытается разрешить загадку существования искусства.

Причем цитату эту следует понимать буквально. Ученые выяснили, что при прослушивании *любимой* музыки активизируются те же центры удовольствия головного мозга, что и при занятии сексом или при употреблении наркотиков. Для профессиональных музыкантов музыка никогда не была работой, для них музыка — это то, что приносит радость, удовольствие.

Подтверждение такому мнению можно найти «от противного»: люди, обладающие выдающимся относительным и/или абсолютным слухом, в некоторых случаях не любят музыку. И наоборот, обладатели прекрасного интонационного слуха, истинные меломаны, не всегда могут аналитически безупречно воспринимать и разбирать различные виды музыки. Еще в XIX веке Стендаль в своей книге «Жизнь России» смог сформулировать разницу между ними. Его рассказ любили цитировать Борис Теплов и Розамунд Шутер-Дайсон, известные исследователи музыкальных способностей. В Италии Стендаль знал старого экспедитора военного бюро, обладателя абсолютного слуха, который совсем не любил музыку: «Всегда предпочитал он тот театр, где не поют. Мне кажется, что музыка не доставляет ему никакого удовольствия, кроме того, что дает упражнение его таланту определения звуков; это искусство не говорит решительно ничего его душе». Приводит Стендаль и другой пример: некий молодой граф Ч. не мог спеть даже нескольких нот без ужасной фальши, при этом он был страстным меломаном. «В особенности поражало то, — пишет Стендаль, — что при таком фальшивом пении он любил музыку со страстью, исключительной даже в Италии. Видно было, что среди разнообразнейших успехов музыка составляла для него необходимую и значительную часть его счастья».

Борис Теплов и Розамунд Шутер-Дайсон, проведя массу экспериментов, сделали вывод, что «музыкальность» определяется во многом, если не полностью, наличием у музыкантов способности воспринимать «красоту» музыки с помощью тембрального слуха. То есть эта способность напрямую связана с наличием у испытуемых тембрального, интонационного слуха и практически никак не связана с IQ, наличием относительного и других видов слуха.

Приведу напоследок еще одну цитату, отражающую тот факт, что многие музыканты не готовы любить музыку «вообще», они любят музыку только «определенного тембрового звучания». Великий виолончелист Пабло Казальс вспоминает:

Увидев виолончель, я не мог оторвать от нее глаз. В первую же минуту, как послышались ее звуки, я был совершенно потрясен. Мне стало нечем дышать. Было в ее звучании что-то такое нежное, такое прекрасное и человеческое — да, да, очень человеческое. Никогда я еще не слышал такой красоты.

Любовь к музыке у Казальса напрямую связана с тембром звучания виолончели. Ну что же, тембр у виолончели действительно очень богатый, низкие звуки открытой струны и влияние резонаторов дают максимально возможное количество слышимых гармоник, обертонов, формантных групп. А значит — самый богатый, насыщенный звук.

3.7. ПОЛИФОНИЧЕСКИЙ И ГАРМОНИЧЕСКИЙ СЛУХ

Полифонический слух — способность восприятия отдельных тем многоголосной музыки раздельно, независимо друг от друга. Гармонический слух — способность улавливать в музыке устойчивые и неустойчивые ступени, тяготения, основные и дополнительные гармонии, чувствовать «правильную» последовательность аккордов (3 и более звуков, взятых одновременно). Например, всем известные на слух «три блатных аккорда» (трезвучия или септаккорды тоники, субдоминанты и доминанты).

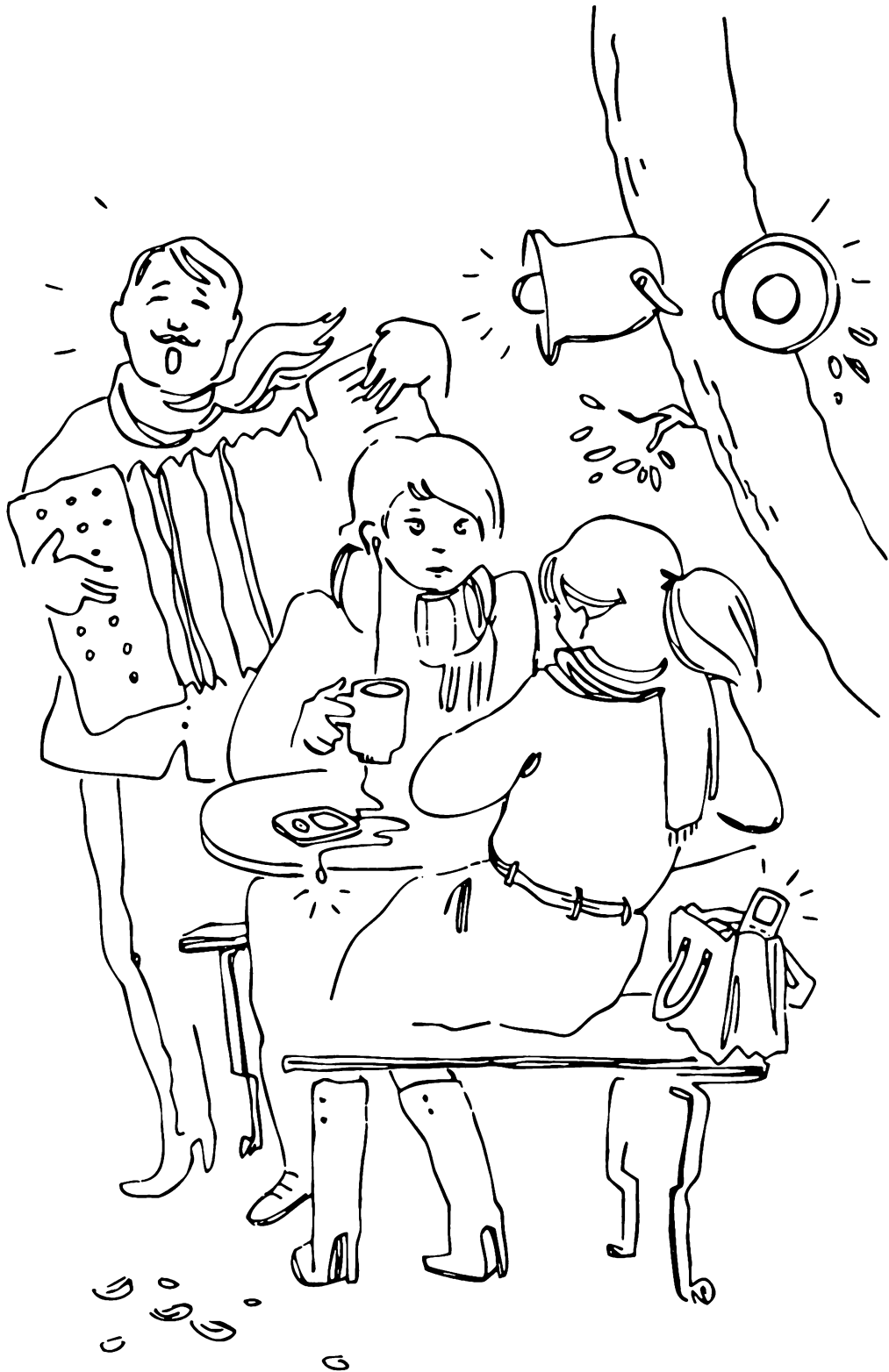
Оба эти понятия (полифонический и гармонический слух) пришли к нам почти одновременно. В древних музыкальных строях и в современных, напрямую с ними связанных (индийская, китайская, монгольская, тибетская музыка), нет понятия полифонии и контрапункта вообще. Использование чистых интервалов, вроде квинты и кварты, приводило к тому, что часть интервалов (двухзвучий) звучала чисто, консонансно, а часть — неблагозвучно, диссонансно. В рамках одной гаммы вообще не существовало трезвучий (аккордов), которые звучали бы благозвучно. Если захватывать часть следующей октавы, то, пожалуй, единственным гармонично звучащим трезвучием были бы трезвучия *до* (чистая квинта) — *соль* (чистая кварта) — *до* (октава) или подобное ему трезвучие *до-фа-до*. Это относится к пифагорейскому и китайскому музыкальным строям. Древние хорошо понимали, что брать сложные аккорды им не стоит, и музыка у них развивалась по другому пути (что не означает, будто эта музыка примитивная).

Принято считать, что полифония в Европе появилась в уже сформировавшемся виде начиная с работ Иоганна Себастьяна Баха и его «Хорошо темперированного клавира». Это произведение — одно из первых, написанных в 12-нотном равномерно темперированном строе, которым мы пользуемся сейчас. Впрочем, не все исследователи согласны с этим, ведь «хорошо темперированный клавир» не обязательно означает «настроенный в равномерно темперированном строе». Однако до сих пор работы Баха являются шедеврами полифонической музыки, образцом для подражания и источником вдохновения для многих и многих. Как мне кажется, дело тут в нескольких вещах. Иоганн Себастьян Бах впервые смог легко переходить из тональности в тональность

по ходу произведения без опасения, что возникнут «волчьи звуки», он легко мог брать любые по сложности аккорды и «разрешать» их в другие, как ему это заблагорассудится. Он мог позволить себе параллельное, одновременное движение нескольких мелодий (тем) — вспомним его знаменитые двух-, трех-, четырехголосные фуги. Представить его ощущения можно примерно следующим образом: ты ездил на «запорожце», который постоянно ломался, слабо тянул и перегревался, — и вдруг пересел на джип «Land Cruiser». Ощущение ошеломляющей свободы. Комфортно, машина мощная, ты можешь ездить по полям, грунтовым дорогам, везде. Также, возможно, чувствует себя художник, который всю жизнь рисовал карандашом, а ему дали набор красок. Огромный, новый мир. Хочется творить, ты — первооткрыватель и творец без ограничений, с лицензией на убийство. Произошла замена не очень подходящего для полифонии (именно для полифонии!) «чистого» строя на равномерно темперированный.

Произведения Баха с математической точки зрения идеальны. Они в какой-то степени не придуманы, следуя за вдохновением, а сконструированы. Не знаю, был ли у Баха абсолютный слух, но я почти убежден, что был. А для таких людей характерны одновременная работа обоих полушарий головного мозга, сочетание логического и целостного восприятий. Фуги, кантаты Баха совершенны как в целом, холистически, как единое произведение, так и в мелких деталях, прописке отдельных тем и гармоний. Ну, и осталась совсем мелочь: Бах просто был гением. Дальнейшее развитие полифонии в европейской традиции продолжили многие композиторы, более или менее талантливые, начиная от детей Баха, заканчивая его внуками. Все описанное выше не означает, что полифонии до Баха не было, просто наш современный равномерно темперированный строй идеален для нее, и, пожалуй, только для нее. Ну, и для гармонического слуха тоже.

Понятие «гармония музыки» не нужно путать с «гармониками» (целочисленные обертоны свободно звучащей струны), «гармонией» (благостное чувство) от музыки и «мировой гармонией». «Музыкальная гармония» как дисциплина, как предметная область — вполне определенная и понятная вещь (хотя весьма сложная при детальном изучении, как, впрочем, и все остальное в нашем мире). В музыкальном ладу, например в гамме *до-мажор*, выделяются отдельные ступени, которые считаются основными, базовыми: 1-я ступень, нота *до* (тоники), 4-я ступень, нота *фа* (субдоминанта) и 5-я ступень, нота *соль* (доминанта). С математической точки зрения — это среднее арифметическое и среднее гармоническое между нотами, частоты которых отличаются в 2 раза, то есть очень важные ступени с точки зрения «математической гармонии». Данные ступени и в музыкальном смысле считаются важными по отношению к своему ближайшему окружению, дополняя влияние устойчивых нот в ладу. Сами по себе тоника, доминанта



и субдоминанта тоже неравноценны, из них самой устойчивой, основной, базовой нотой является тоника (*до*). К ней явно тяготеет доминанта (*соль*), субдоминанта (*фа*) тяготеет к тонике слабее. Конечно, в чистом виде никто не использует эти три ноты. На базе тоники строится трезвучие, в *до-мажоре до-ми-соль*, на базе субдоминанты — трезвучие *фа-ля-до*, на базе доминанты — *соль-си-ре*. Наглядно видно, что в состав трезвучия тоники входит слегка неустойчивая нота *соль* (доминанта, тяготеющая к тонике), в состав субдоминантового трезвучия входит нота *до* (тоника), и это трезвучие звучит довольно устойчиво из-за наличия в нем тоники. Доминантовое трезвучие звучит совсем неустойчиво из-за наличия в нем ноты *си*, отличающейся от тоники (*до*) всего на полтона. Нота *си* является самой неустойчивой во всем ладу и сильно тяготеет к тонике. В сложной симфонической музыке чаще всего используются и четырехзвучия, построенные на базе основных функций (септаккорды), пятизвучия (нонаккорды), многочисленные обращения аккордов, полные или с пропущенными нотами, с повышенными или пониженными ступенями. Из этих аккордов составляются сложные последовательности, «разрешающиеся» друг в друга. Часто в сложной музыке вообще невозможно выделить в чистом виде, что за гармоническая функция используется в аккордах — тоника, субдоминанта или доминанта, настолько они сложные. Например, аккорд *фа-ля-до-ми-соль* одновременно является и субдоминантовым, и тоническим. Особенно ярко это можно видеть в гармонии джаза, там все весьма сложно и запутанно. (Я очень, очень кратко коснулся дисциплины «музыкальная гармония», в полном объеме она широка и глубока, бездонна и бесконечна, ее вообще не существует, как и всего нашего мира.)

Предметная область «музыкальная гармония» развилась после появления равномерно темперированного строя, где можно брать сложные аккорды без опасения, что возникнут сильные диссонансы, биения, «волчьи звуки». Диссонанс в один тон, полтона для нашего уха привычен, в отличие от диссонанса в четверть тона (50 центов) и меньше (до 10–15 центов).

Классические образцы применения идей устойчивых-неустойчивых ступеней в рамках 7-ступенного лада (различные виды и подвиды мажора и минора) и идей полифонии (а также многих других идей) возможно наблюдать в произведениях «венских классиков»: Моцарта, Бетховена и Гайдна. До сих пор их музыка близка широкому кругу слушателей, что опровергает тезис, будто гениальные вещи всегда скучны и малопонятны. Именно за то, что музыка «венских классиков» воспринимается нами естественно, за то, что мы воспринимаем переходы от одних нот, гармоник, аккордов к другим как «правильные», и отвечает гармонический слух. Более поздние композиторы, вроде Шопена или Чайковского, тоже писали вполне приличную

и понятную многим людям музыку. Еще более поздние композиторы, вроде Прокофьева и Шостаковича, уже использовали очень сложные гармонии, малопонятные широкой публике. Я очень люблю и уважаю музыку Прокофьева и Шостаковича, но она никогда не станет любимой для широкой публики. То же происходит с джазом и с современной «классической» музыкой — это удел небольшого круга слушателей и ценителей. Гармонии, используемые там, настолько сложны, что нетренированное ухо их вообще не различает, музыка воспринимается как шум и набор не связанных между собой звуков.

И полифонический, и гармонический слух успешно поддаются развитию. Если очень сложно, почти невозможно развить у человека, не склонного к музыке, абсолютный, относительный и тембральный слух, то полифонический и гармонический значительно улучшаются после занятий сольфеджио, хоровым пением.

Конечно, есть люди, более склонные к полифонии и восприятию гармонии, а есть — менее склонные. Даже выдающиеся музыканты. Например, Иегуди Менухин, по его собственному свидетельству, не отличался блестящим гармоническим слухом:

Мой слух, весьма передовой, если речь идет о пении по нотам и прочих мелодических упражнениях, был твердокаменно туп в номенклатуре гармонии.

Отличное чувство мелодии, однако, позволило ему играть вместе с индийскими музыкантами.

То есть каждый человек, каждый музыкант обладает своим собственным набором, своей «гребенкой» способностей. Нет людей, у которых все способности были бы развиты блестяще, это вообще противоречит известной максиме: «Наши недостатки являются прямым продолжением наших достоинств». Какой из видов слуха лучше? Главное — желание, трудолюбие и умение пользоваться тем, что дано от природы. Наш слух уникален, помним об этом. Каждый человек уникален, будь он курицей или орлом.

3.8. Способность к импровизации

Эту главу хочется предварить небольшой зарисовкой. Я случайно посмотрел запись концерта Дэйва Брубeka в Московской консерватории. Концерт относится примерно... к девяностым годам XX века, точно не помню. Смешные прически, старомодные одежды, ностальгия по молодости и глупости.

В те времена музыканты, по крайней мере в России, четко делились на «классических» и «джазменов»; ну, еще и на «рокеров» и прочих, но не о них речь. Так называемые джазмены часто вообще

не знали нот, чистая импровизация. А так называемые классические музыканты презирали джазменов за неумение играть нормально, по нотам. Импровизация — это, может быть, и неплохо, но не зная нот, никак нельзя сыграть ре-минорную токкату и фугу «сами знаете кого», даже фа-минорную не сыграть. А хочется. Эксперименты великого саксофониста Алексея Козлова с квартетом Шостаковича и введение в темы импровизаций музыки Римского-Корсакова и Прокофьева выглядели по тем (да и по этим) временам истинным авангардом.

Мы отвлеклись. Старенький Дэйв Брубек приехал в Московскую консерваторию. Был он у себя в Америке ни много ни мало профессором. Музыки, а не физики какой-нибудь. И он неплохо умел играть на рояле. Лица у зрителей в зале консерватории были очень прогрессивные. Такие подчеркнуто и демонстративно свободные от предрассудков, что хочется дать в глаз. Впрочем, не суди, как говорится.

Брубек попросили поимпровизировать на русскую тему, он выбрал «Эй, ухнем!», к нему неожиданно присоединился русский студент-скрипач, сидевший с настроенной скрипкой в первом ряду. В общем, импровизация во всем.

А потом встал мальчик лет десяти и на вполне приличном английском спросил заезжего музыканта:

— А я вот, мистер Брубек, хочу играть джаз и импровизировать со страшной силой, а мне мама велит играть классическую музыку по нотам. Как мне быть, мистер Брубек?

— Где твоя мама? Нет? Это всё условности, мой мальчик! Все великие музыканты были импровизаторами! Моцарт, Стравинский, Бах. Все. Так что играй пока по нотам «К Элизе», старательно, а вечерами, когда никто не слышит, импровизируй на темы «Take Five» или на тему ре-минорной токкаты и фуги «сам знаешь кого».

Конечно, я передаю диалог по памяти, но суть именно такова.

Дэйв Брубек, безусловно, не самый типичный американский джазовый пианист. Он не похож на Оскара Питерсона или на Дюка Эллингтона, и вообще он белый. Не так часто он играет «классический свинг», некоторые недоброжелатели даже считают, что он «свинг» играть не умеет (в частности Майлз Дэйвис так говорил), хотя другие считали, что он перерос «классический свинг» и достиг необыкновенной свободы и совершенства (Чарли Паркер); впрочем, бог с ними, с недоброжелателями и хвалителями, приличным людям они не интересны.

Брубек учился у Арнольда Шенберга, какое-то время, по его собственным словам, находился под сильным влиянием Прокофьева и Шостаковича. То есть Дэйв Брубек почти изначально творил на стыке классической музыки и джазовой — конечно, мы все понимаем сейчас условность такого деления.

Ну и, заканчивая преамбулу, хочется привести цитату Брубека о музыке:

Очень хорошее определение — современная музыка. Она должна быть просто продолжением вас самих. И нравиться вам — вот что самое главное. Если она нравится и другим — еще лучше, тогда это уже коммуникация, общение. Очень важно делиться с кем-то своими чувствами, сильными эмоциями. Ненавистью, гневом, но еще лучше — любовью. Лишь бы вы что-то сильно чувствовали, и если вы артист, это всегда удастся так или иначе передать. Одним нравится веселье, другим грусть, но в любом случае мы имеем дело с человеческими эмоциями. Их-то художник и должен выражать, будь он живописец, писатель или музыкант.

Итак, амбула.

Мало кто относит способность к импровизации в музыке к видам музыкального слуха. А я хочу и отнесу. Основанием к этому служит то, что ряд видов музыки, например джаз и индийские раги, то есть принципиально импровизационную музыку, люди, обладающие способностью к импровизации и не обладающие, воспринимают совершенно по-разному. А что ответственно за восприятие музыки, как не музыкальный слух?

Способность к импровизации — странная вещь. Опишу вкратце, как она проявилась у меня. Когда мне было лет четырнадцать, меня послали с группой трубачей и тромбонистов на «халтуру», на внеплановый концерт в какой-то санаторий. Наградой были обед, пара шоколадок и возможность концертной практики. Я в машине быстренько просмотрел ноты, по которым должен был аккомпанировать духовикам, и расслабился. На концерте в маленьком акустическом зале духовики читали ноты с пюпитров, а я читал их с листов, стоявших на подставке рояля. И вот в один прекрасный момент валторнист, переворачивавший мне ноты, рассыпал их по всей сцене, часть листов улетела в зал, достать их быстро не было никакой возможности. Чувство ответственности у меня тогда было огромным, и я решил ни в коем случае не прерывать выступления. Но что делать?! Ведь нот этих я не видел до того ни разу! Пришлось выкручиваться, играть по наитию, играть по базовым гармониям. Эта часть выступления слушателям понравилась больше всего, ведь мы все подобрались, оживились и играли как единая, спаянная команда. После того случая у меня сломался какой-то внутренний барьер, и до сих пор самым любимым способом что-либо играть самому является импровизация на произвольные или заданные темы.

С моей точки зрения, способность к импровизации напрямую связана с гармоническим слухом и чувством ритма. Джазмены (классические) играют по определенным темам, схемам, квадратам, гармо-



ниями. Можно брать любые ноты, в любой последовательности, но гармоническая основа и ритм являются едиными для всех музыкантов. То же происходит и в индийской музыке раги: рага лишь музыкальный скелет, на который (вокруг которого) исполнитель «нанизывает» свои ноты, в зависимости от своего эмоционального состояния, времени суток или акустики помещения.

Мне кажется, музыку можно легко разделить на два класса (даже записанную, зафиксированную в виде нот на палочках): сконструированную (придуманную и продуманную в голове) и импровизационную (подсознательную, бессознательную). Конечно, эти два класса музыки существенно пересекаются, но все же на слух различия легко определить.

Не говоря больше ни слова о джазе как о принципиально импровизационной музыке, выделим импрессионистскую музыку Дебюсси, Равеля или Сен-Санса. Они явно следовали бессознательному чувству, эмоции при написании музыки, добиваясь максимального впечатления. Этим они близки, естественно, к Клоду Моне, Ренуару и другим художникам-импрессионистам (не путать с постимпрессионистами).

Музыка же Баха, «венских классиков» и многих других композиторов является хорошо продуманной, сбалансированной (не вся, конечно). Даже при видимых напряжениях и дисбалансах это просчитанный художественный прием. Такая музыка может быть соотнесена с академической, классической живописью, полотнами Леонардо да Винчи или Караваджо. Глупо спрашивать, какой художник лучше — Леонардо или Ван Гог. Они оба великие, но писали совсем в разных стилях и руководствовались совсем разными концептуальными установками.

Не всякий композитор может легко импровизировать. Как и не всякий блестящий импровизатор может писать законченные музыкальные произведения. В чем тут дело, не очень понятно. Основанная на личном опыте статистика (явно недостаточная для того, чтобы делать выводы) говорит о том, что примерно половина музыкантов обладает способностью к импровизации, другая половина — нет. Нередко прекрасный исполнитель чужих произведений отвратительно импровизирует, примитивно и прямолинейно. Однако попадаются и прекрасные «универсалы», в частности — многие музыканты оркестра Юрия Башмета. Гершвин замечательно импровизировал и писал достойную музыку крупных форм. Рахманинов был замечательным исполнителем и композитором. Шостакович мог импровизировать, аккомпанировать на рояле на любые темы, любым солистам, с ходу, создавая благозвучные и напевные композиции; музыку он тоже писал, как известно, — но какую музыку!

3.9. ЧУВСТВО РИТМА

Чувство ритма для меня является особенно любимым чувством. Как правило, в других людях ты восхищаешься тем, чем сам или совсем не обладаешь, или обладаешь в минимальной степени. Так, например, я испытываю благоговение и трепет перед замечательной художницей Леной Шмелевой-Найман, которая проиллюстрировала эту книгу. При том обилии людей, которые могут делать иногда даже вполне интересные композиции с помощью компьютера, рисовать пером по бумаге могут не многие, очень не многие. У меня такого умения вовсе нет.

Так и с чувством ритма. При наличии у меня приличного относительного и интонационного слуха сыграть что-то в сложном ритме для меня было сплошным мучением. Если ритмы $2/3$ или $4/3$ я еще как-то мог осилить, то «пятиоли», синкопирование, использование «слабых» долей было для меня невыполнимой задачей. Может быть, поэтому одни из моих любимых книг — «Фейнмановские лекции по физике» и «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман?». Ричард Фейнман — гениальный физик, лауреат Нобелевской премии и т.д. и т.д. Но прежде всего — он крайне неординарный человек, имевший от природы множество задатков, однако развивший в себе и те способности, которыми он обладал в малой степени. Когда, к примеру, он случайно оказался в Бразилии и преподавал там физику в университете (португальский язык он выучил тоже случайно, просто пошел вслед за красивой блондинкой, а она шла изучать португальский язык), его яркая натура требовала «продолжения банкета». И Фейнман с группой уличных музыкантов стал разучивать (придумывать) музыкальные композиции самба для карнавала в Рио. Играть он решил на ударных. Латиноамериканские ритмы чрезвычайно сложны. Сложна и техника игры на ударных. Но трудился он очень упорно. Утром читал лекции в университете, возвращался в шикарный отель, переодевался в драные джинсы и футболку, спускался в таком виде на минус первый этаж, выходил через паркинг и шел репетировать с музыкантами. Вечерами, сидя в стриптиз-баре, он писал статьи, за которые потом получил Нобелевскую премию. Нужно ли говорить, что их уличный ансамбль тоже получил престижный приз и был отмечен на фестивале? Потом музыкантов приглашали выступать во многие места, в том числе и в большие концертные залы в США. Однажды кто-то из коллег Фейнмана увидел его на сцене, долго тер глаза и думал, что ему почудилось. Музыканты так и не знали, с кем они концертировали, знали лишь о нем, что это просто длинный белый парень, неплохо стучащий на пандейро. Фейнман мог выстукивать ритмы практически любой сложности, $5/7$, $7/11$, со слабыми долями, сложным рисунком, мгновенно переключаясь с одного ритма на другой. Часто он делал это автоматически, барабанил пальцами по краю стола, чем вводил в ступор студентов,



разбиравшихся в музыке: то, что он делал, сделать было невозможно! Это или ошибка, или гениальность! Фейнман на спор учил художника теоретической физике, а художник учил его рисовать. То есть они оба пытались развить способности, которыми, как считали, совершенно не обладали. Имя художника потерялось, а Фейнман научился неплохо рисовать, и у него было несколько персональных выставок. Не из уважения к нему как к физику, а из уважения к его работам.

Генрих Нейгауз в своей книге «Об искусстве фортепианной игры» говорил, что ритм был в начале всего. Ритмами и вибрациями действительно пронизана вся наша природа. Шива совершает свой космический танец, распространяя первичный изначальный непроявленный звук, создавая и преобразуя наш мир с помощью ритмов и проявленных звуков.

Ритм существовал до рождения музыки. Множество вещей совершаются человеком ритмично, большое количество работ требует согласованных действий, действий многих людей в одном ритме, в одном темпе. Человек, задающий ритм работ, является часто ключевым в группе работников. Вспомним «бесполезного» человека, сидящего на корме байдарки с восемью гребцами, — именно он определяет, победит его команда или нет. Ритмы бывают и более сложными. Например, бурлацкая песня не так примитивна по своему ритму, там есть, и фазы расслабления, фазы монотонного движения и фазы концентрации энергии. То есть ритм в работе помогает правильно распределять свои силы, организовывать совместную работу и служит связующим элементом действий всего коллектива, помогая образовывать единый эгрегор.

Все известные обряды общения с духами происходят под определенный ритм: определенный ритм способен ввести человека в транс и предоставить ему возможность общаться с духами напрямую. Можно, например, ритмично собирать мухоморы. Ритм во всех племенах служил и служит объединяющим началом во время важнейших событий: рождения детей, свадеб, похорон.

Значение ритма как организующей силы в обществе хорошо понимали и в Древнем Китае, Индии и других древних цивилизациях. Ритм объединяет. Действовать ритмично — значит действовать сообща, вместе. Поэтому в современной музыке ритм явно выделен там, где важны коллективные переживания большого числа слушателей. Например, в рок-музыке. Как подвид и почти предельные примеры ритмичной музыки — транс- и хаус-вечеринки. На них ритм вытесняет практически все остальные составляющие музыки, многие люди действительно погружаются в трансовые состояния. Все это здорово, организующая роль и прочее, — однако надо помнить, что игра с пограничными состояниями мозга при помощи ритма и музыки крайне опасна без пристального контроля со стороны гуру. А много ли есть гуру вокруг нас? Так что...

В других видах музыки, в классической и индивидуалистической, роль ритма не является определяющей. Такая музыка направлена на создание частных, а не коллективных переживаний, ритм здесь лишь одна из составляющих музыкального произведения.

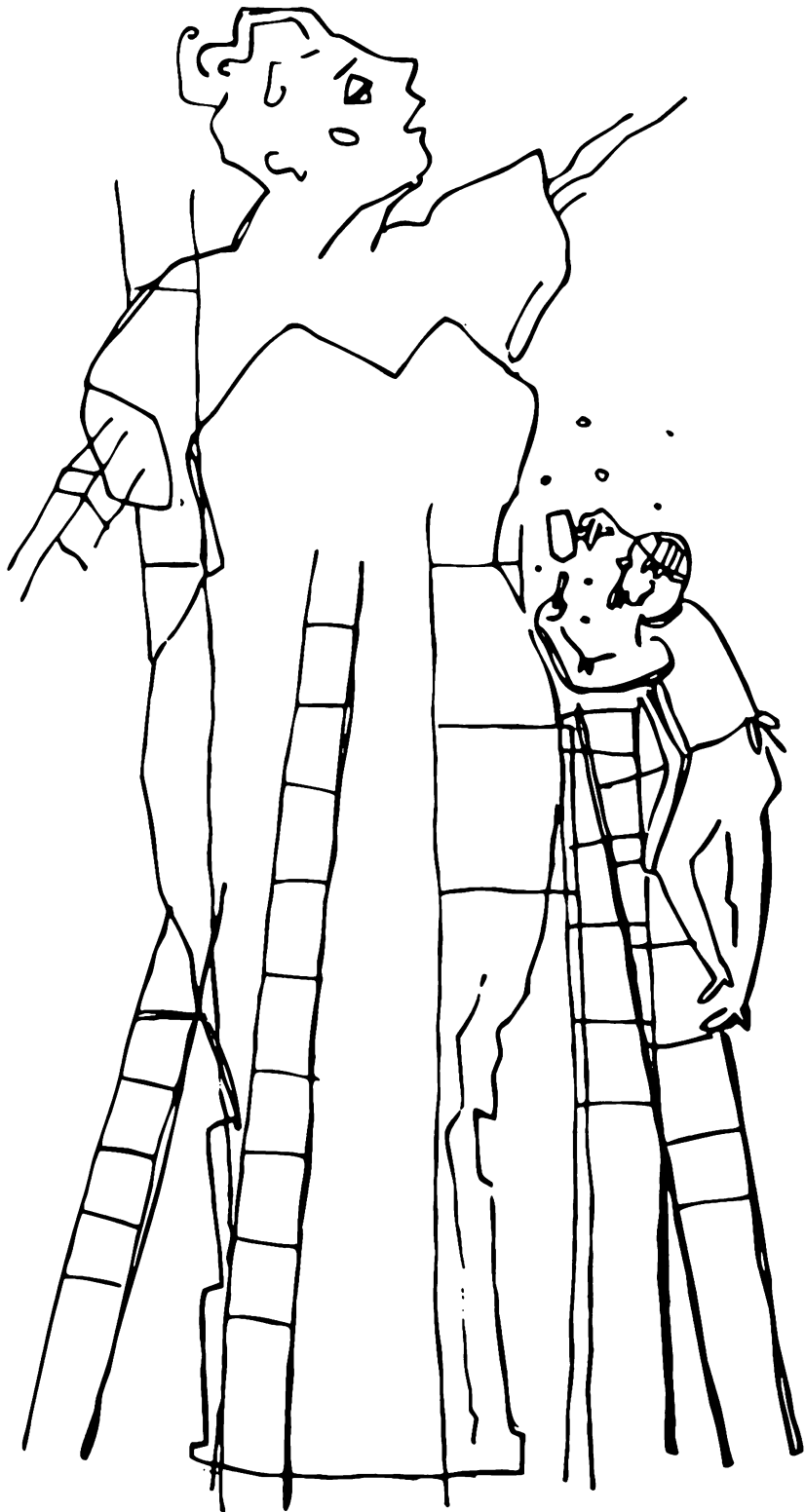
Ритм — отражение в музыке движения, периодических процессов окружающего мира. Человек, настроившись на определенный ритм, повторяет его, даже если ритм уже прекратился. Под определенный ритм человек неосознанно или осознанно выполняет какие-то движения. Это свойство ритмичной музыки используется в танцах. Происходит слияние мускульно-двигательной активности, восприятия ритма, гармоний и мелодии. Ритм при этом может быть и очень сложным, он может дразнить, ласкать, напирать, обволакивать, провоцировать, неожиданно менять рисунок... Не зря многие сравнивают удачный танец с удачным сексом.

3.10. Чувство музыкальной формы (крупной формы, архитектурный слух)

Чувство музыкальной (крупной) формы, то есть архитектурный слух, можно отнести к видам музыкального слуха. Оно заключается в способности воспринимать крупное, большое по протяженности музыкальное произведение как единый, цельный кусок. Не зря для молодых музыкантов на экзамене, школьном концерте обязательным является исполнение произведения крупной формы: концерта для фортепиано с оркестром (вторым роялем) или сложной сонаты. Конечно, наряду с этюдом, развивающим технику исполнения, полифонией, сами понимаете что развивающей, пьесой, отражающей умение точно прорабатывать детали.

Музыкальная энциклопедия приводит следующее определение: «Чувство музыкальной формы — способность осознавать, понимать, оценивать, соразмерять отношения между различными компонентами музыкальных произведений, их функциональные значения в целом (квадратность, неквадратность, трехчастность, экспозиция, развитие, завершение развития)». Это один из наиболее сложных видов музыкального слуха, он граничит уже с творческим музыкальным мышлением.

Чувство крупной формы сродни стратегическому мышлению в бизнесе и на войне. Ты можешь быть прекрасным коммерсантом, уметь договариваться с людьми, то есть владеть тактикой бизнеса (исполнительской техникой), но если ты не сумеешь правильно определить свой товар или услугу (не можешь проникнуться сутью музыкального произведения), правильно нацелить его на свой сегмент рынка (оценить адекватность произведения аудитории), осознать свое конкурентное преимущество (определить свой индивидуальный



стиль исполнения и трактовку произведения) и создать план развития бизнеса хотя бы на ближайшие 1000 лет (по Воланду), то ты проиграл. Так и в музыке. Ты можешь кусочками играть очень хорошо. Но ты должен чувствовать в целом распределение ролей музыкальных частей и фраз. Смотреть на большое музыкальное произведение как бы сверху. То есть обладать стратегическим видением. Многие музыканты им не обладают. И это тоже не страшно. Страшного вообще ничего нет. Видов музыки — тысячи, миллионы. Хватит всем.

Вот что пишет на тему архитектурного слуха выдающийся музыкант Иегуди Менухин: его интересовало, как из неосознанных идей произрастает готовое музыкальное произведение:

Как биохимик, обнаруживающий, что каждая человеческая клетка несет отпечаток всего организма, которому принадлежит, я должен был установить, почему именно эти, а не другие ноты принадлежат этой сонате. Мог ли я теперь удовлетвориться обычным музыкальным анализом, который говорит об экспозиции, разработке, репризе и коде и всевозможных модуляциях в тех или иных тональностях... Такая информация так же бесполезна, как описание человека, который весит столько-то, имеет темные волосы и карие глаза; сам человек ускользает от этих категорий. Композитор же прокладывает свой путь сквозь всю симфонию к последнему триумфальному такту только для того, чтобы убедиться, насколько выбор каждого шага на этом пути был неизбежен. Неизбежность вовсе не лишает композитора его лавров, потому что только интуиция может открыть ему саму эту неизбежность и отвести от него все прочие ноты, и только он мог выносить и создать те, которые он в действительности создал.

Архитектонический слух следит за связностью развития и взаимным соответствием, пропорциональностью частей музыкальной формы. Он создает музыкальную гармонию, отслеживая соразмерность частей и целого, улавливая закономерности строения музыкальной формы на всех уровнях. Если эта форма гармонична, то наше эстетическое чувство воспринимает ее как своего рода закон, где все именно таково, каким должно быть. Гармоничные вещи вообще воспринимаются очень простыми, естественными, понятными, но попробуйте создать такие самостоятельно! У древних греков «закон» и «мелодия» обозначались одним и тем же словом «номос», подчеркивая заключенную в мелодии высшую закономерность. Архитектонический слух тесно связан и с искусством архитектуры, где гармоничность пропорций, красота и математика неотделимы друг от друга.

В какой-то степени архитектурный слух аналогичен смыслу и схеме написания этой книги. Идея книги зародилась как образ, как чувство неудовлетворенности и конфликта внутренних ощущений и внешней информации. То есть зародилась где-то в правом полуша-

рии мозга, в нелогичной его половинке (или четвертинке). Потом она мигрировала в левое полушарие, обросла формулами и графиками, добавив новые страдания от осознания того, что книгу никто не поймет и писать ее нет никакого смысла. Так и с архитектурным слухом. Но мы снова отвлеклись.

Отнюдь не всегда неосознанные идеи, родившиеся в правом полушарии головного мозга, с радостью воспринимаются левым полушарием, обладающим способностью к строительству, воплощению замысла, используя логический потенциал и накопленный опыт. Например, Глинка так и не смог написать свою задуманную «Казацкую симфонию». Он хотел совместить народную музыку, напевную и плавную с симфонической строгой формой. Левое полушарие мозга Глинки не справилось с этой задачей. Вспоминая о «Казацкой симфонии», он утверждал: «Ежели я строг к другим, то еще строже к самому себе». Но это не страшно. Как писали Стругацкие в «Понедельнике...»:

— Г-голубчики, — сказал Федор Симеонович озадаченно, разобравшись в почерках. — Это же n-проблема Бен Б-бецалеля. К-калиостро же доказал, что она n-не имеет p-решения.

— Мы сами знаем, что она не имеет решения, — сказал Хунта, немедленно оцетиниваясь. — Мы хотим знать, как ее решать.

— К-как-то ты странно рассуждаешь, К-криссто... К-как же искать решение, к-когда его нет? Б-бессмыслица какая-то...

— Извини, Теодор, но это ты очень странно рассуждаешь. Бессмыслица — искать решение, если оно и так есть. Речь идет о том, как поступать с задачей, которая решения не имеет. Это глубоко принципиальный вопрос, который, как я вижу, тебе, прикладнику, к сожалению, не доступен. По-моему, я напрасно начал с тобой беседовать на эту тему.

Иногда нерешаемые задачи все же решаются, тогда рождаются шедевры. Софья Губайдулина говорила: «Я хочу писать музыку так, как будто никто и никогда раньше не играл на музыкальных инструментах». Часто у нее получалось.

Гению нужно лишь вовремя родиться, как считал академик Лев Арцимович. Так случается и с музыкальными произведениями, и с научными открытиями. Бывает, что в голове уже накоплен строительный материал для нового произведения, почва готова, инь перезрел и ждет идеи, замысла, ждет вспышки ян. И когда замысел приходит, левое и правое полушария работают с потрясающей синхронностью и согласованностью, мгновенно под каждую идею находятся пути ее реализации. Человек испытывает творческий экстаз. Рождаются великие музыкальные произведения или великие научные теории.

Простейшие соображения о том, что такое «цветной» слух, возникают исходя из его названия. Человек, обладающий «цветным» слухом, видит въяве или воображает различные цвета, целые зрительные образы при прослушивании музыки либо отдельных звуков. (Аналогичные картины возникают при приеме галлюциногенных психотропных препаратов, например LSD.) Таких людей называют синестетиками¹. Сейчас считается, что синестезия не является психическим расстройством. Синестетиками были, например, Скрябин и Римский-Корсаков. В симфонической поэме Скрябина «Прометей (Поэма огня)» есть даже специальная строчка «Luce» («Свет»). В том или ином виде ощущение связи отдельных нот с цветом или другими чувственными ощущениями (запах, тактильные ощущения, теплота-холод) присуще практически всем обладателям абсолютного слуха. Также можно вспомнить, что раннее музыкальное развитие ребенка обостряет и развивает не только слух, но и остальные органы чувств. Иногда области, ответственные за различные сенсорные системы, в головном мозге перекрещиваются и взаимодействуют между собой. Это нормально, не нужно немедленно тащить своего ребенка к психиатру. Если такие ощущения не мешают человеку жить, они могут сильно разнообразить его чувственное восприятие.

В древних культурах определенные ноты музыкального ряда связывались с определенными цветами. Вот, к примеру, краткая справочная таблица соответствия нот и цветов в культурах Индии и Китая:

индия				
Чакра	Цвет	Число лепестков	Стихия	Нота европейского звукоряда (приблизительно)
Муладжара	красный	4	земля	до
Свадхистана	оранжевый	6	земля	ре
Манипура	желтый	10	вода	ми
Анахата	зеленый	12	воздух	фа
Вишудха	голубой	16	огонь	соль
Аджна	синий	96	эфир	ля
Сахасрара	фиолетовый	1000	эфир	си

¹ Синестезия (греч. συναίσθησις — одновременное ощущение, совместное чувство) — в психологии явление восприятия, когда при раздражении одного органа чувств (вследствие иррадиации возбуждения с нервных структур одной сенсорной системы на другую) наряду со специфическими для него ощущениями возникают и ощущения, соответствующие другому органу чувств.

Цвет	Стихия	Стороны света и пр.	Нота	Вкус и ощущения
ЖЕЛТЫЙ	земля	центр Мироздания, государство, времена года, планета Сатурн	чжи	плодоносящее и сладкое
ЗЕЛЕНЫЙ	дерево	восток, весна, планета Юпитер, дракон, подданные	цзюэ	гибкое и кислое
КРАСНЫЙ	огонь	юг, лето, планета Марс, феникс, правосудие	шан	горящее, поднимающееся вверх, горькое
БЕЛЫЙ	металл	запад, осень, планета Венера, тигр, правитель	гун	изменяемое, острое
ЧЕРНЫЙ	вода	север, зима, планета Меркурий, черепаха, смута	юй	текущее вниз, мокрое и соленое

Очень сложно комментировать эти таблицы, пожалуй, я просто не буду этого делать. Замечу только, что соответствие цветов различным нотам в разных культурах сильно разнится. Также индивидуальна связь отдельных нот с определенным цветом у обладателей «цветного» и абсолютного слуха. Так что не буду пытаться сделать какие-либо «квазинаучные» обобщения, например, ставя в соответствие частотам волн световой волны частоты нот звукоряда. Такие параллели, приведенные в литературе, мне кажутся искусственными. Делают их только искусствоведы или младшие научные сотрудники непрофильных институтов. Использование же связи чакр с определенной нотой и цветом (Индия) или органов тела с нотами и цветом (Китай) допустимо только в рамках традиции, под присмотром учителя, гуру, сэнсэя или даосского мудреца. Где же их найти, спросите вы. Не знаю. Но они есть. На Востоке говорят, что учитель приходит к ученику тогда, когда ученик готов найти учителя, готов начать учиться.

Если с «концептуальной точки зрения» связь отдельных нот с определенными цветами неочевидна, это вовсе не означает, что нельзя цветомузыкальное представление использовать, скажем, для обучения детей музыке. В этой связи большой интерес представляет музыкально-педагогическая система Валерия Брайнина. У детей, обучающихся по этой системе, развивается точное восприятие интонации, микротонового слуха, образуется прочная связь между нотами определенного музыкального лада и цветом. Развивается также вторичный абсолютный слух. Если кратко — дети становятся более талантливыми. Полноценное синестетическое восприятие при этом у детей не развивается. Но, может быть, это и неплохо? Ведь синестетика — это пограничное состояние между нормой и психическим заболеванием; думаю, не стоит стремиться к нему специально. Если природа что дала — так и дала, используем и развиваем то, что есть, а есть у каждого немало.



Феномен «цветного» слуха интересовал как психиатров — они исследовали болезненные состояния пациентов, которые возникали вследствие перекрещивания чувственных восприятий, — так и музыкантов, которые пытались создать синтетические произведения искусства, цветомузыку. Французский психолог Теодюль Рибо приводил три гипотезы происхождения цветного слуха:

По эмбриологической гипотезе, это могло бы быть следствием неполной дифференциации между чувствами зрения и слуха и фактом случайного оживания такой особенности, которая в некоторую отдаленную эпоху была, может быть, общим правилом в человечестве. Анатомическая гипотеза предполагает сообщения или анастомозы между центрами зрительных и слуховых ощущений в головном мозгу. Затем есть физиологическая гипотеза нервной иррадиации и психологическая, видящая здесь ассоциацию.

Со времен Рибо научная подоплека обоснования «цветного» слуха не сильно изменилась, по крайней мере мне не известны какие-либо новые гипотезы.

Конец XIX — начало XX века было временем многочисленных революций. Революции происходили не только в социальном мире, но и в мире искусства: импрессионизм в живописи и в музыке, постимпрессионизм, авангардное искусство, символисты, декаденты и прочие фовисты. Итальянский футурист Джакомо Балла, английский художник Александр Римингтон и многие другие экспериментировали со связью цвета и музыкальных нот. Были построены многочисленные цветомузыкальные инструменты. Часть этих экспериментов, например «световая симфония» «Прометей» Скрябина, представляют большой интерес — все же Скрябин был гением. Но эти эксперименты показали также, что прямая зависимость, непосредственная связь между частотами звука и частотами света носит искусственный характер. Теория оказалась неверна. Да и бог с ней, с теорией. Вот, например, пуантилисты тоже какую-то странную «квазинаучную» теорию придумали насчет смешения цветов и рисовали свои картины точками (пуантами). Теория неверна, но это не мешает нам наслаждаться полотнами Сёра, Синьяка, Писсарро.

В общем, «цветной» слух — не такой уж подарок людям, которые им обладают. Это еще один элемент сенсорной системы, еще одна способность чувствовать что-то остро. Многие люди с хорошим музыкальным слухом физически страдают, слушая слегка фальшивое исполнение, а для большинства это не является проблемой. Люди с хорошим литературным вкусом и знанием русского языка не могут слушать выступления наших политиков, настолько плох их русский язык, информация, доносимая до электората, просто не усваивается такими любителями родного языка, их

сильно тошнит. Люди с развитым логическим мышлением не могут читать потрясающую литературу про «влияние музыки на рост помидоров» и подобную ей или смотреть передачу «Битва экстрасенсов». И т.д. Кто-то назвал поэта «большим пальцем, стукающимся обо все углы». Жить в нашем мире гораздо проще, если у тебя минимальная чувствительность ко всему, лучше всего, если останутся лишь базовые инстинкты: желание есть, желание вовремя опорожниться, желание продолжить род, избегание болезненных для тела ситуаций.

Но что это я все о грустном? Инструмент, которым в данном случае является «цветной» слух, не плох и не хорош сам по себе. Как нож, как автомобиль БМВ, как мощный бицепс. Все дело в том, как мы его будем использовать. И его вполне можно использовать, делая богаче собственную жизнь и, если ты обладаешь талантом создателя, жизнь других. Даже черепах.

3.12. НАСЛЕДОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ МУЗЫКАЛЬНОГО СЛУХА

Эта проблема интересует многих: откуда произошли те или иные способности человека и можно ли развить любую способность, отсутствующую от рождения? В наиболее откровенном варианте вопрос звучит достаточно провокационно: «Можно ли из господина Х сделать Моцарта?» Иными словами, можно ли создать с помощью тренировки, обучения и воспитания все эти IQ, креативности и прочие одаренности и таланты? Или это «подарок» от Бога, от родителей, флюктуация генофонда, генотипов, с которыми уже ничего не сделать?

Поскольку тема всегда была провокационной, исследователям приходилось непросто. С одной стороны, нужно было льстить общественному самолюбию, заявляя: всего можно достичь, только трудись. С другой стороны, феномены Моцарта и других гениев приводили ученых в ступор. Известно изречение Иоганна Себастьяна Баха:

Мне пришлось очень прилежно заниматься: кто будет столь же усерден, достигнет того же.

Сколько было усердных музыкантов — и сколько Бахов среди них? Даже если брать в расчет только фамилию.

В недемократическом XIX веке была распространена теория Фрэнсиса Гильтона, который утверждал, что талант и гениальность предопределены генетически (про гены он, конечно, не говорил). Также он утверждал, что некоторые расы менее талантливы, нежели другие. Уже понятно, что последнее его утверждение неверно, распространение образования, различных тестов по всему миру это доказало. Таланты есть в каждой народности и национальности.



Однако подвидом подобных рассуждений является и следующее мнение. Журналистка как-то обратилась к известному тренеру по художественной гимнастике Ирине Винер с вопросом:

«Ирина Александровна, хоть я гимнастику очень люблю, но все равно не могу понять: как в принципе можно выделять такие безумные выкрутасы руками и ногами?»

На что Ирина Винер, нимало не смутившись, ответила:

«Нужно спрашивать не как, а кому. Тому, кто от природы получил дар — гибкость и хорошую растяжку. И однажды попал к тренеру, у которого в свою очередь дар — умение все это грамотно использовать, а перед тем увидеть и распознать».

То есть получается, что первично не усердие, не прилежание, а дар. Человек, у которого есть явно выраженные от природы способности, талант, должен встретить учителя, у которого есть дар взрастить этот талант. Потом, конечно, от ученика требуется фантастическое усердие и трудолюбие, но — потом.

В конце XX века ученые-психологи А. Эрикссон, Дж. Слобода и М. Хау придумали теорию «deliberate practice», «целенаправленных занятий». Понятия «способности», «одаренность» и «талант» они объявили «культурным мифом», а тем, кто хочет достичь выдающихся успехов в какой-либо сфере человеческой деятельности, посоветовали соблюдать всего несколько условий:

- заниматься больше, чаще, усерднее;
- начинать тренироваться с самого раннего детства, а родителям эти усилия всячески поддерживать, правильно мотивировать ребенка;
- найти педагога высочайшей квалификации и не менее 10 лет грызть гранит науки, искусства или спорта под его руководством.

Трудно с этим спорить. Практически все выдающиеся музыканты и спортсмены начинали заниматься с самого раннего детства и трудились упорно. Один пример Рави Шанкара чего стоит! Кроме того, все без исключения, кто проявляет большое терпение и волю к победе, добиваются очень многого (по сравнению с тем, что они могли раньше, — забыли сказать ученые). И это бесспорно. Большим искушением для демократов от науки является утверждение, что определенный уровень прогресса в деятельности достигается всеми за аналогичное время. А вот здесь мы и сталкиваемся с неприятными вопросами. Даже оставим в покое Моцарта. Одни дети в музыкальной школе тратят на изучение чего-нибудь 100 единиц времени, другие — 50, 20, 5. Некоторые дети обладают столь выдающимися способностями, что кажется, будто они обучались музыке в прошлой жизни. А математик Галуа тра-

тил на решение школьных математических задач в 10–100 раз меньше времени, чем его сверстники. Что делать?

Думается, ответ известен. Ничего нового. Группа людей с разными способностями попадает к хорошему (очень хорошему) учителю, гуру. Мудрый гуру посылает всех учеников на ..., оставляя при себе одного-двух, самых талантливых, самых трудоспособных, самых *адекватных данному учителю*. У них будет шанс стать великими, хоть и небольшой. Это утверждение совершенно не противоречит моему более раннему утверждению в главе «Восприятие звуков с точки зрения нейрофизиологии» «Музыка и мозг ребенка». Мое мнение простое — с ребенком нужно заниматься с ранних лет, с двух лет, с года, с нуля. Период с года до 7–9 лет особенно важен для развития всех способностей ребенка. Когда человек немного подрастет, его нужно обучать музыке, игре на музыкальных инструментах, это развивает *все* сенсорные системы ребенка, а также его математические способности. Хороши также занятия танцами и рыбалкой. Вообще, можно заниматься любыми видами искусства. Для укрепления воли и характера неплохо заниматься спортом, лучше — не травмирующим тело. Но не нужно пытаться сделать из ребенка гения. Нужно развивать способности, данные человеку от природы, и сделать так, чтобы его «недостатки» не мешали бы ему жить в социуме. У гениев жизнь сложна. Гения из любого человека сделать не получится, а вот талантливого и успешного — вполне решаемая задача.

Хорошо, примем за основу, что необходимое, но не достаточное условие успеха в музыке — родиться с нужными задатками. Тогда встанет вопрос: а как наследуются такие способности? Хочется ответить, что как-то наследуются. По Дарвину, естественный отбор, закрепление полезных мутаций и пр. Технари женятся на технарях, так как учатся вместе, у них рождаются дети-технари. Однако статистика демонстрирует обратное.

Дин Симонтон, известный знаток математики, статистики и исследователь одаренности, считает, что понятие «врожденный» не тождественно понятию «унаследованный от родителей». Талант и успешность определяет не одна только какая-либо способность человека — хороший музыкальный слух или блестящие математические способности. Нужна совокупность очень многих способностей. Иные из нас, например, знают потрясающих IT-шников, лучше директоров фирм осведомленных, как должна работать компания, но у них нет менеджерских навыков, и они просто сидят за компьютерами и наслаждаются своими фантазиями. Таких примеров множество. Симонтон пишет:

Семейная наследственность таланта снижается по мере того, как достижения в данной области требуют все большей многосоставности, — вероятность унаследовать всю требуемую конфигурацию психических свойств становится все меньше.

Воланд, один из крупных знатоков человеческой души, говорил: «Как причудливо тасуется колода, кровь!» Действительно, вероятность получить от родителей «наилучший набор способностей» невелика. Колода после тасования выдаст новый, уникальный расклад. Но не все так печально: набор успешных качеств был таковым в уникальной ситуации, в которой оказывался родитель ребенка. Ребенок будет жить в другом мире, сталкиваться с другими ситуациями, и адекватность его реагирования зависит и от его природного, уникального набора способностей, и от его умения пользоваться этими способностями, и от его трудолюбия. На последние два пункта родители, учитель и сам ребенок могут влиять. А это 95–99% успеха, даже в глубоко научных или творческих областях. Такие мнения я слышал и от профессора в области теоретической физики, и от артистки драматического театра.

И еще здоровье важно. И воск. И пчелы — как класс.

Вернемся к генетике и евгенике. Замечено, что если некая совокупность людей накопила значимое количество способных людей в той или иной области, появление выдающегося таланта в той же области возрастает. Это простая математика и статистика. Вспомним многострадальный еврейский народ. Во время сорокалетнего (?) странствования по пустыне сменилось несколько поколений, отсеялись слабые телом и духом. «Искусственную селекцию» еврейского народа продолжали многочисленные «доброжелатели», начиная с Александра Македонского и заканчивая (заканчивая ли?) Адольфом Гитлером, которые истребляли евреев массово и поодиночке. Стоит ли удивляться, что среди лауреатов Нобелевской премии по физике, выдающихся скрипачей, чемпионов мира по шахматам такой большой процент евреев? У еврейской нации выдающийся генфонд.

Мы опять отвлеклись, вспомним о музыке. Исследователи музыкальных способностей Розамунд Шутер-Дайсон и Кэлин Гэбриэл пишут:

Вероятность появления очень музыкального ребенка составит 86%, если оба родителя одарены, 60% — если только один из них наделен музыкальным дарованием, и 25% в случае немзыкальности обоих родителей.

В последнем случае, предполагают авторы, «способности могли быть унаследованы от более дальних родственников» — или от некоторых формально «не-родственников», добавлю я.

Профессиональные способы тренировки слуха тоже не всегда действенны. В этом убедились психологи Джерар Фогарти, Луиза Бартс-ворт и Филип Джиринг. Они работали с 87 студентами-музыкантами (возраст от 17 до 50 лет), исследуя, насколько изменяется под

воздействием занятий по сольфеджио способность правильно интонировать мелодии. Для большей точности результатов в группе были люди, играющие на разных инструментах, дабы проверить, не влияет ли избранный инструмент на развитие слуховых способностей. Все испытуемые в течение учебного года трижды выполняли тесты на интонирование.

Повторные анализы не обнаружили улучшения в выполнении тестов студентами во всех трех попытках, а также какую-либо разницу между студентами, играющими на различных инструментах. Результаты говорят о том, что тесты на интонирование измеряют способность, которая не поддается существенной модификации под воздействием обучения и примерно одна и та же по всем инструментальным группам.

Речь идет о внутреннем слухе и ладовом чувстве, от которых зависит чистота интонации. Экспериментаторы, как видим, не обнаруживают заметного прогресса этой способности в ходе занятий по сольфеджио.

Интересно сравнить слух профессиональных музыкантов и немусыкантов. Слух музыкантов чувствует себя особенно неуверенно, когда психологи предлагают им упражнения с атональной или микротоновой музыкой. Здесь навыки, полученные во время обучения и относящиеся обычно к музыке прошлых веков, не помогают им, и музыканты ошибаются так же, как совсем неопытные в музыке люди. Это касается профессиональных музыкантов со средними слуховыми данными, каковых большинство. Музыканты же с исключительно хорошим слухом справляются со слуховыми упражнениями в атональном контексте столь же успешно, как и в тональном. Различия, замеченные психологами в работе испытуемых с разными музыкальными системами, говорят лишь о том, что превосходство профессионалов порой связано не с превосходством способностей, а с накоплением знаний, умений и навыков.

Можно сказать, что в течение жизни человека происходят раскрытие и проявление его музыкальных способностей, их реализация, но не их качественный рост: музыкальные способности большинства взрослых людей вполне сопоставимы со способностями детей. На это обращали внимание многие исследователи музыкального восприятия. Более того, поскольку способность к восприятию верхних частот звука с возрастом у человека резко снижается, можно ожидать ухудшения тембрального (интонационного) и некоторых других связанных с ним видов слуха.

О чем свидетельствует этот и многие другие аналогичные эксперименты? Во-первых, о том, что за один месяц девять женщин не могут выносить младенца: для раскрытия, развития музыкального слуха

требуются длительное время и значительные усилия как педагогов, так и ученика. Во-вторых (и об этом писал еще Майкопар в книге «Музыкальный слух»), занятия сольфеджио для людей с хорошим от природы слухом скучны и малополезны, для людей с не очень хорошим слухом — тоже малоэффективны, кроме того, они сильно понижают самооценку учеников, что также не является положительным моментом обучения. Как всегда, многое здесь сводится к поиску адекватного учителя: одним детям не стоит учиться на профессиональных музыкантов, другим детям нужна индивидуальная интенсивная программа обучения, учитывающая их индивидуальные особенности, в том числе и музыкального слуха.

Примерно по такой схеме и обучают детей в музыкальной школе при Московской консерватории, талантливые дети там имеют индивидуальные программы обучения, многие предметы общеобразовательного курса они сдают экстерном, часто — с блеском.

Данные современной нейropsychологии подчеркивают повышенную аналитичность восприятия и высокое качество пространственного мышления «музыкального мозга». Это объясняет частое совпадение музыкальной и математической одаренности у одних и тех же людей. Приведу только один пример из множества. Вернон в диссертации на звание доктора философии Кембриджского университета указывал на то, что в 1927–1928 годах 60% профессоров-физиков и математиков Оксфордского университета были одновременно членами университетского музыкального клуба, и только 15% всех остальных профессоров посещали тот же самый клуб. Одаренным математикам музыка была нужна гораздо больше, чем всем остальным вместе взятым.

Отдельной темой является связь таланта с психическими отклонениями. Известна теория Ломброзо о родстве гениальности и помешанности. «Добрые» российские психологи еще в двадцатые годы XX века в сборнике «Клинический архив одаренности и гениальности» высказали следующую мысль: «Гениальный или замечательный человек есть результат таких двух скрещивающихся биологических родовых линий, из которых одна линия предков, примерно скажем, линия отцовских предков, является носителем потенциальной одаренности, другая же линия предков, материнская, является носителем наследственного психотизма или психической ненормальности». Причем и психотизм, и одаренность могли прийти к гению с одной и той же наследственной стороны. Например, в роду Чайковского дед и дядя по материнской линии страдали эпилепсией, отец поэта Надсона умер в психиатрической лечебнице, отцом Паганини был страстный любитель музыки и крайне психопатическая личность, а родители астронома Кеплера страдали такими психическими расстройствами, что мальчик осиротел при живых родителях. Что здесь является причиной, а что — следствием, сказать сложно. Одно лишь понятно: талантливые и ге-

ниальные люди обладают повышенной чувствительностью и, как результат, эмоциональной неустойчивостью. А что считать ненормальностью?.. Безусловно, Эйнштейн — ненормален, а нормален обычный солдат вермахта, и их гораздо больше (по определению, «нормален» — от слова «норма», то есть статистически). Однако Эйнштейн как-то симпатичнее.

3.13. МУЗЫКАЛЬНЫЕ СТРОИ

Поговорим немного о музыкальных строях. Более подробно они рассматриваются в моей следующей книге, «Музыкальная математика древних. Поиск гармонии»; здесь я расскажу о них лишь очень кратко.

Прежде всего стоит понять, что такое собственно музыкальный строй, звукоряд. Когда мы говорим о том, что какая-то музыка нам нравится, а какая-то не нравится, например нравится Сороковая симфония Моцарта и не нравится песня «А я шальная императрица», то мы говорим о конкретных музыкальных произведениях, написанных в каком-то одном музыкальном строе. В данном случае — в современном 12-нотном равномерно темперированном строе.

Какая аналогия тут возможна? Скажем, все мы любим вкусно поесть. Если хотим что-то съесть, выбираем какое-то блюдо: борщ, шашлык или тирамису. Но каждая хозяйка готовит борщ по-разному, соответственно каждый борщ отличается по вкусу, и это замечательно, мир разнообразен. В кулинарной книге с тысячами рецептов вначале описывается, из каких продуктов следует готовить выбранное блюдо. Нужно взять молодую картошку, артишоки, китайский соус хой син, лук порей, японские водоросли нори, двухлетнего осетра и т.д. Так вот, в каком-то смысле звукоряд, музыкальный строй — это набор продуктов, из которых потом искусные повара готовят тысячи, сотни тысяч самых разнообразных блюд. Современный европейский музыкальный строй один, с помощью него можно написать и гениальную, и абсолютно бездарную музыку.

Конечно, есть особенности. Как некоторые блюда китайской кухни никогда не сможет повторить итальянский повар, так и хороший плов не удастся сделать японцам, несмотря на их любовь к рису. Различные традиции, различный набор традиционных продуктов и специй. В замечательной книге «Суп из акульего плавника» англичанки Фуксии Данлоп пишется про то, как она обучалась секретам приготовления блюд китайской кухни. Это огромный, совершенно неизвестный для европейца мир, мир китайской (сычуаньской, пекинской и т.д.) кухни, удивительный набор продуктов и способов их приготовления. Так и профессиональный западный музыкант не может играть традиционную индийскую музыку. Для обучения ему потребуется такое же, если не большее, количество времени, как если бы он изучал ее с нуля, то есть не один десяток лет.

К вопросу построения звукорядов, необходимых для сочинения музыки, можно подойти с разных сторон. Ведь что такое музыка? Это некое сочетание звуков, меняющее наше психоэмоциональное состояние.

Либо опытным, либо теоретическим путем, исследуя строение слухового аппарата, люди определили, что есть благозвучные (консонансные) и неблагозвучные (диссонансные) сочетания звуков (музыкальных звуков).

Если нам нравятся какие-то сочетания двух звуков, интервалы, то мы можем захотеть придумать много звуков, сочетания которых будут нравиться, это понятное желание. То есть естественное желание для человека, которому что-то нравится или что-то не нравится, — закрепить в памяти, зафиксировать то, что ему нравится.

Напомню, что самыми благозвучными интервалами являются те, что образуются между первыми гармониками струны. Октава, соотношение частот $2/1$, вторая и первая гармоники. Квинта, интервальный коэффициент $3/2$, третья и вторая гармоники. Кварта, $4/3$ и так далее.

Если такие интервалы, по гармоникам струны, откладывать от какой-то одной ноты, можно получить некий звукоряд. Он называется «натуральным». В нем будет столько нот, сколько нам нужно, не обязательно 12, как мы привыкли сейчас. Минусом «натурального» звукоряда является то, что некоторым привычным нам интервалам, скажем большой терции *до-ми*, соответствуют сразу два интервальных коэффициента — $5/6$ и $7/6$. И какой брать? Нет ответа.

В общем, в настоящее время «натуральный» звукоряд в чистом виде не используется нигде. В Средние века, правда, музыканты полюбили интервал, образующийся между 7-й и 4-й гармониками ($7/4$), он еще называется натуральной септимой. На особую «приятность для слуха» (непосредственно связанную с простотой числового отношения) данного интервала впервые обратили внимание европейские ученые XVIII века. Джузеппе Тартини в 1754 году ввел для натуральной септимы специальный нотный знак (выглядит как «недописанный» бемоль), а Иоганн Кирнбергер в 1771 году даже придумал для натуральной септимы особую букву 'i'. Но это скорее экзотика.

Посмотрим теперь, как строили звукоряд древние люди.

Вероятно, самым древним известным нам звукорядом является индийский. Время создания его теряется где-то в тысячелетиях до н.э. Первые упоминания о традиционных индийских музыкальных инструментах вина встречаются в базовых трактатах индийской культуры «Рамаяна» и «Махабхарата». Брахма создал Вселенную с помощью звука, а его подручный Шива с помощью космического танца и космических вибраций преобразовал изначальный «непроявленный» мир в видимый. История создания индийской музыки, традиции обуче-

ния, отношения гуру — шишья (учитель — ученик) очень интересны. Из соображений краткости и кротости я остановлюсь здесь только на математических принципах построения музыкального строя.

Индийцы взяли за основу одну ноту, скажем ноту *до* 1-й октавы. Потом взяли 2-ю гармонику — опять *до*, только октавой выше (звук удвоенной частоты). Еще взяли 3-ю гармонику, частота которой в 3 раза выше основного тона, — это примерно нота *соль* следующей октавы, опустили ее на октаву вниз и получили ноту *соль* 1-й октавы. Обрадовались, что получили «гармоничную», в сочетании с первой (нотой *до*), ноту. Потом взяли 4-ю гармонику, опять ноту *до* на 2 октавы выше, потом 5-ю, опустили ее уже на 2 октавы вниз и т.д. Таким образом, используя первые 7 нечетных гармоник свободно звучащей струны, они получили основу своего звукоряда, строй нот свара. Для нас важно запомнить главное — как бы экзотично нам ни представлялось сейчас звучание индийской музыки (по сварам, основным 7 нотам индийского звукоряда) — она *абсолютно идеально* сконструирована с точки зрения математики и акустики. Идеальнее просто некуда. Чистые гармоники отдельно звучащей струны. Правда, эти рассуждения относятся лишь к самому древнему из дошедших до нас способов настройки индийских инструментов, гандхара-грама. Существуют и другие способы, например шадджа- и мадхьяма-грама, хотя и в настройках шадджа и мадхьяма тоже присутствуют абсолютно чистые интервалы — квинты и кварты. Но об этом более подробно — в книге «Музыкальная математика древних. Поиск гармонии». Здесь же таблица звуковысотных отношений нот индийского звукоряда приведена скорее для справки. Но даже из этой «простой» таблицы видно, что индийцы в каждом из способов настройки инструмента стремились выделить чистые интервалы: квинты, кварты. Найдите их в разных звукорядах самостоятельно.

СТУПЕНИ ГАММ ГАНДХАРА-, ШАДДЖА- И МАДХЬЯМА-ГРАМА

Названия индийские	Математические пропорции гандхара-грама (реконструкция В.Е. Еремеева)	Математические пропорции шадджа-грама	Математические пропорции мадхьяма-грама	Математические пропорции суддха-мела, рамаматыя	Названия европейские (примерно)
Са	1	1	1	1	С
Ри	9/8	10/9	10/9	9/8	D
Га	5/4	32/27	32/27	32/27	E
Ма	11/8	4/3	4/3	4/3	F
Па	3/2	3/2	40/27	3/2	G
Джа	13/8	5/3	5/3	27/16	A
Ни	7/4	16/9	16/9	16/9	B

Вообще в индийской гамме 22 ноты, 7 нот свара и 15 дополнительных нот шрути. Это удивительное звучание! Тонкое, с потрясающей мелодикой исполнение традиционных индийских раг основано на идеальном с точки зрения математики и психоакустики звукоряде. Послушайте, пожалуйста, эту музыку «вживую», вы получите несравненное удовольствие!

А в Китае считают, что традиционный звукоряд создал император Хуан-ди, Желтый император, в III тысячелетии до н.э. Звукоряд он создал наряду с созданием топора и всей китайской цивилизации.

Вот как примерно описывают историю создания китайского музыкального строя Люй-Люй.

Согласно преданию, отраженному в «Люйши Чуньцю» (Весны и осени господина Люя), написанном в III в., 12 люй возникли во времена императора Хуан-ди, который приказал своему музыкальному министру Лин Луню изготовить бамбуковые флейты (люй). Когда тот взялся за дело, то перед ним вдруг появились две божественные птицы — самка и самец Фениксы, которые спели по 6 нот: 6 «иньских» и 6 «янских», находящихся в определенных отношениях. Постигнув таким образом устройство звукоряда, Лин Лунь изготовил 12 бамбуковых флейт, которые и составили основу музыкальной системы. Затем Хуан-ди приказал отлить 12 колоколов с такими же тонами. Первый был назван хуан чжун (желтый колокол), так как желтый цвет был символом императорской власти.

В основе принципов создания китайского звукоряда, как и индийского, лежат космологические теории, теории создания Вселенной и нашего видимого, «проявленного» мира, подходы взаимодействия ян и инь, мужского и женского начал, созидательной силы и среды осуществления идеи. Трактовок множество. Принципы взаимодействия ян и инь описаны, в частности, в одном из базовых трактатов китайской цивилизации «И Цзин» (Книга Перемен). На принципах «И Цзин» построена и китайская музыка. Предположить, к какому времени относится создание «И Цзин», очень сложно, можно лишь сказать, что этот трактат был древним даже для Конфуция, который жил в VI веке до н.э. А спросить не у кого. Даже Конфуций уже умер.

С помощью октаво-квинтового круга китайцы создали 12-нотный (в пределах октавы) звукоряд Люй-Люй. Сейчас обычно выделяют пентатонику, 5 нот из звукоряда Люй-Люй. Это многим кажется странным, зачем брать всего 5 нот, когда есть 12? Причины такого подхода также уходят в древность, к понятию «У Син» (пять стихий) о гармоничном сочетании вещей. Как говорил Лао Цзы в двенадцатом чжане трактата «Дао Дэ Цзин»:

Пять цветов притупляют глаз.

Пять нот притупляют слух...

Однако исторически в Китае существовала и гептатоника (7 нот). К тому же нужно помнить, что строй Люй-Люй нетемперированный, то есть расстояния между соседними нотами отличаются для различных нот. И мы получаем не одну пентатонику, а 60 различных ладотональностей, с различными окрасками и множеством звуковых нюансов (12 нот Люй-Люй, от каждой из которых может быть отложена любая нота пентатоники, т.е. $60 = 12 \times 5$).

Надо сказать, что и древний китайский календарь, известный нам в упрощенной форме (год Кролика, год Дракона и т.д.), построен по такой же математической схеме. 12 знаков-животных и 5 стихий — получается 60-ричный календарь, где 12 животных — это 12 земных ветвей, а 5 стихий, каждая из которых есть в янском и иньском проявлении, — 10 небесных стволов. Каждый год обозначается двумя знаками-иероглифами — животное и стихия, земная ветвь и небесный ствол. А так как календарь имеет не только год, но еще и месяц, день и час, получалось восемь знаков, которые, как верили китайцы (да и сейчас верят), определяют их судьбу. Есть ли какая-то связь между 60 ладотональностями, возникающими из 12 нот Люй-Люй, и древним китайским 60-ричным календарем или это гармоничное совпадение, утверждать не берусь. Наверняка есть, но этот вопрос следует адресовать синологам.

Музыка в Китае считалась неотъемлемой частью всех наук, ею было пронизано все общество. Конфуцианские ритуалы совершались под строго определенную музыку. За правильностью камертонной настройки инструментов следило даже специальное министерство!

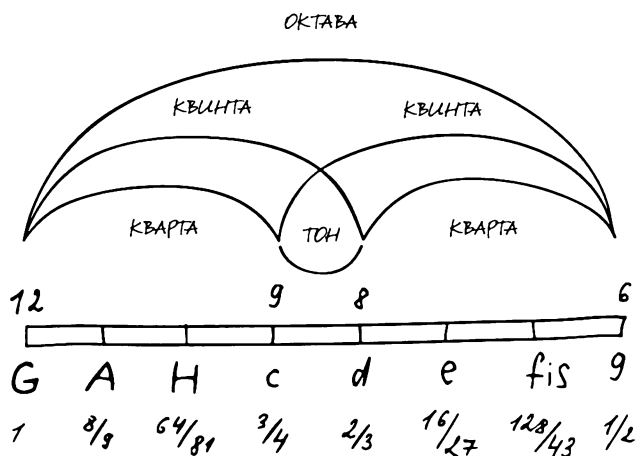
Кстати, сам Конфуций был замечательным музыкантом, его любимый инструмент — цитра Цинь. Ее звукоряд отличается от звукоряда Люй-Люй, построенного по принципам октаво-квинтового круга. Звукоряд цитры Цинь близок к «натуральному» звукоряду. И сейчас есть великие мастера, играющие на Цинь. Их мало, но записи с такой музыкой существуют. Хотя, конечно, музыку нужно слушать «живьем».

Удивительным является тот факт, что звукоряды Пифагора и древних китайцев совпадают вплоть до мелочей, что наглядно представлено на рисунке. Почему так случилось, никто не знает.

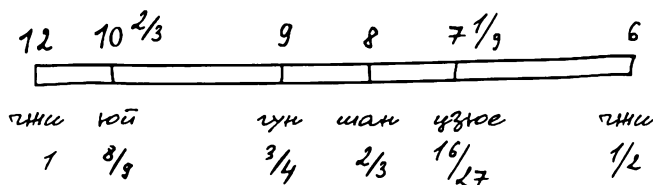
Пифагор, основатель европейской математической и музыкально-философской школы, жил в VI веке до н.э., в так называемое осевое время, когда жили Конфуций, Лао Цзы, Будда Гаутама. Общались ли они между собой? Это неизвестно. Разве что с помощью Интернета.

Формально музыкальная традиция Пифагора — самая молодая по сравнению с традициями индийцев и китайцев. Но Пифагор практически всю свою жизнь, с 18 до 50 лет, провел в обучении у египетских жрецов и у мистиков Вавилона. А их традиции тоже уходят в неизвестные тысячелетия до н.э.

Греция



Китай



О Пифагоре у нас известно лишь то, что он изобрел теорему и назвал ее своим именем. В действительности же Пифагор стал одной из ключевых фигур в развитии всех европейских естественно-научных дисциплин, математики, музыки, философии. Его философские концепции фактически совершенно не известны нашим современникам, хотя они по своей сути чрезвычайно близки воззрениям Будды Гаутамы, а его концепция «музыки сфер», о «музыкальном» устройстве космоса, практически совпадает с аналогичными идеями древних индийцев и китайцев. Но поскольку нельзя объять необъятное, остановимся здесь лишь на музыке и математике.

Пифагор, возможно, был первым человеком в Европе, кто провел настоящие научные эксперименты со струнами, выявляя математико-акустические закономерности, анализируя гармоники свободно звучащей струны с помощью специального приспособления — монохорда. В результате этих экспериментов Пифагор выделил идеально гармоничную, с его точки зрения, четверку чисел: 12, 9, 8 и 6; 9 и 8 — это среднее арифметическое и среднее гармоническое

между числами 12 и 6 (интервальный коэффициент октавы $2/1$). 9 и 8 соответствуют абсолютно консонансным интервалам квинта и кварта (см. это на рисунке на стр. 203). Квинтами и квартами (средними арифметическими и средними гармоническими) пронизана не только вся музыка, но и вся современная наука: физика, биология, математика. Можно сказать, что Пифагор был первым, кто понял, что гармония в мире, во всех его аспектах — науке, музыке, космосе, философии — едина и может быть выражена в виде чисел. Поговорить о «музыке сфер», законах устройства Вселенной мы здесь не успеем, просто в силу недостатка времени и букв.

В античной Европе принципы построения музыкального строя, заложенные Пифагором, развивались, появились такие понятия как «роды мелоса»: диатоника, хроматика, энгармоника, вплоть до двух-октавной «полной системы». Все эти новые музыкальные построения основывались на тетрахорде (4 звука) Пифагора.

В V веке н.э. добро победило зло, развращенная, ужасная Римская империя рухнула, похоронив заодно и почти всю античную культуру, в том числе и музыкально-математическую. Наступили «темные времена» Средневековья. В тот период в христианской Европе ничего интересного (с музыкальной точки зрения) не происходило. Даже соловьи не пели, а если и пели, то фальшиво. Но начиная с X века Европа потихонечку стала оживать и окончательно ожила в эпоху Ренессанса (XV–XVI века). Так что же, совсем ничего интересного не происходило, что ли, в Средние века с музыкальной точки зрения?

Происходило. Только не в христианско-европейском мире, а в арабском. Сейчас мало что известно об арабской музыкальной культуре того времени, практически нет книг на эту тему ни на русском, ни на английском языках. Немного есть на французском, что и понятно.

Можно как угодно сильно недооценивать вклад арабской культуры в европейскую, но одно только перечисление слов: арабские цифры, алгебра, алхимия, алкоголь — заставит задуматься о том, где же развивались естественно-научные дисциплины после античных времен, на какие знания опираются современная математика, физика, химия.

Аналогичная история произошла и с музыкой. Идеи Пифагора проникли в арабский мир и были с восторгом там приняты. В частности, относительно популярный тогда таджикский музыкант Авиценна (Абу Али Хусейн ибн Абдаллах ибн Сина, 980–1037) в своем трактате о музыке восхищался гармоничностью пифагорейского тетрахорда $12/9/8/6$ и многими другими теориями Пифагора, и не только Пифагора.

В Средние века в Багдаде и Кордове, столицах арабского мира, в библиотеках переводились и изучались труды Гомера, Гиппократ, Платона, Аристотеля, Евклида, Архимеда и др. Думается, что без такой проделанной работы европейский Ренессанс был бы невозможен.

Самый старый из сохранившихся источников по арабской музыке — трактат IX века «Risala fi hubr ta'lif al-alhan» (Об опытах составления мелодий) Исаака аль-Кинди. Аль-Кинди описывает настройку уда, музыкального инструмента, подобного лютне. Кстати, само слово «лютня» — арабского происхождения, от слова «уд» — веточка; впрочем, есть и другие переводы этого слова. Сравните арабское «аль-уд» с португальским «alaud», испанским «laud», итальянским «liuto», английским «lute» и т.д. Полагаю, в европейскую культуру перешло не только название музыкального инструмента, но и способ настройки.

12-нотный звукоряд аль-Кинди строится по октаво-квинтово-му принципу, как и пифагорейский и китайский. В основе его — тот же тетрахорд Пифагора. Звукоряд получается из двух различных «спиралей квинт»: одна восходит на 4 квинты (четыре $3/2$), а другая нисходит на 7 квинт (семь $3/2$). В дальнейшем арабский звукоряд развился до 22-нотного двухоктавного звукоряда, 17-нотного звукоряда в пределах одной октавы и других микротоновых строев. Музыку в подобных строях можно услышать и сейчас, это интересно.

В арабском мире было создано множество трактатов о музыке, самым знаменитым из которых является «Kitab al-musiqi al-kabir» (Большая книга о музыке), написанный аль-Фараби в X веке. Кстати, когда аль-Фараби описывает способы настройки инструмента уд, он оперирует таким понятием как «подвижный порожек». Порожки на гитаре фиксированы, а на инструментах уд, лютня были подвижными, что позволяло добиваться точнейшей настройки инструмента при исполнении музыки в различных ладах. Те же принципы применяются и в настройке инструмента ситар, на котором играет Рави Шанкар. Ситар — это отнюдь не индийский музыкальный инструмент, а арабский, внук таджикского сатора. Вообще, описание музыкальной, математической, естественно-научной культуры арабского мира заслуживает отдельной книги. Может быть, я ее как-нибудь и напишу.

А все же, как родился современный звукоряд в Европе?

Когда во времена Ренессанса европейские слушатели потребовали создать такие музыкальные инструменты как орган, клавикорд и др., возникли проблемы с настройкой этих инструментов. Дело в том, что все музыкальные строи, что индийский, что пифагорейский и китайский Люй-Люй, — нетемперированные строи. То есть расстояние между двумя соседними нотами (грубо говоря, между любыми соседними белой и черной клавишами рояля) разное.

— Ну и что? — спросите вы меня? — В чем тут проблема?

— Да ни в чем, полифонию играть сложно!

— Так не играй полифонию! — скажете вы мне.

— А мне очень хочется, — отвечу я вам.

— Ну и дурак! — скажете вы мне. И будете правы.

По непонятной мне причине массовым явлением в Европе стало желание петь и играть на музыкальных инструментах не просто мелодии, а брать более сложные аккорды: трезвучия, септаккорды и пр. Такие аккорды (почти все такие аккорды) во всех нетемперированных строях звучат диссонансно.

Опираясь на пифагорейский музыкальный строй, европейские музыкальные теоретики были им при этом весьма недовольны. Больше всего претензий они предъявляли к большой терции *до-ми*. В пифагорейском строе такая терция звучала очень диссонансно. Ее заменили на «чистую» терцию из «натурального» звукоряда с интервальным коэффициентом 5/4. Такой строй называли «чистым». В таблице для сравнения приведена гептатоника (7 нот) пифагорейского и «чистого» музыкального строев:

Названия нот	C	D	E	F	G	A	H	C
Интервальные отношения «чистого» строя	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2/1
Интервальные отношения пифагорейского строя	1	9/8	81/64	4/3	3/2	27/16	243/128	2/1

Но это, конечно, не решило проблем. Терции стали звучать чисто, однако некоторые интервалы, например квинты, — чрезвычайно диссонансно. Их называли в Средние века «волчьими» или «дьявольскими».

Многие музыкальные теоретики и математики пытались решить проблему «волчьих» квинт. Кеплер, Декарт, Лейбниц, Эйлер ломали себе головы над этим вопросом. Головы сломали, а совершенный музыкальный строй не придумали.

Изобретателем современного равномерно темперированного 12-нотного строя следует считать китайца. Звали его Чжу Цзай-юй, он жил в XVI веке, был принцем династии Мин и питал страсть к занятиям музыкой, математикой и астрономией. Это было время, когда налаживались контакты между Китаем и Европой, и, видимо, каким-то образом идея равномерной темперации проникла на Запад. Первое упоминание о ней появилось в неопубликованных бумагах математика Симона Стевина (1548–1620). В 1636 году сведения о равномерной темперации были изданы французским монахом-миноритом, теологом, физиком и музыкальным теоретиком Мареном Мерсенном в его книге «Всеобщая гармония». К концу XVII века темперированный строй исследовал немецкий музыкальный теоретик и акустик Андреас Веркмейстер, которому часто и приписывается изобретение этого строя. А в 1722 году публикуется эпохальная работа И.С. Баха «Хорошо темперированный клавир». Тут важно подчеркнуть, что понятие «хо-

рошая температура» во времена Баха совсем не подразумевало равномерную темперацию в современном понимании. В ходу было целое семейство неравномерных темпераций, позволявших более-менее успешно играть в любой из тональностей. Вот бы послушать произведения Баха на тех инструментах, на которых он сам играл! Эх!

Высота ноты в современном 12-нотном равномерно темперированном строе вычисляется чрезвычайно просто — это будет корень 12-й степени (12 нот в октаве) из 2 в степени n (интервальный коэффициент октавы — 2):

$$F_n = F_0 \sqrt[12]{2^n},$$

где F_0 — частота начальной ноты звукоряда, хроматической гаммы, например ноты *до*, а n — номер ноты.

Из формулы видно, что отношение частот двух соседних нот (расстояние между нотами n и $n + 1$) одинаково по всему звукоряду и равно $\sqrt[12]{2}$. Именно поэтому он называется равномерно темперированным. Другое следствие этой формулы: для любой ноты, кроме 12-й (октава), отношение частот F_n и F_0 — иррациональное число и не может быть выражено в виде отношения целых чисел. То есть, по определению, *все* интервалы в нашем современном строе, кроме октавы, диссонансны!!!

Сейчас мы привыкли к звучанию современного музыкального строя. Однако квинты, кварты, а особенно большие и малые терции звучат в нем с явно слышимыми биениями. Детский слух эти биения хорошо слышит, взрослый, «развитый» слух — часто уже нет.

Но не всё так плохо! Начиная с Иоганна Себастьяна Баха с его «Хорошо темперированным клавиром» полифония и современная музыкальная гармония завоевали весь современный музыкальный мир. В 12-нотном равномерно темперированном строе написаны великие произведения Шопена, Шуберта, Шенберга, Шостаковича, Шнитке и др. Это замечательная музыка. Нужно лишь всегда помнить, что есть и иная, не менее замечательная, музыка, например раги Рави Шанкара, горловое и обертонное пение тибетских монахов, византийская музыка монахов из Афона, японская музыка Гагаку и много, много других видов музыки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предисловии было написано, почему я захотел написать эту книгу и как она была написана.

Теперь мне хочется сказать пару слов о том, чем же она интересна.

Самое интересное в ней, как мне кажется, это то, что она задает много вопросов, на большую часть которых нет ответа. Частично в книге нет ответа на них потому, что я не являюсь специалистом во множестве областей. Но в основном нет ответов потому, что человечество еще не нашло этих ответов. И это здорово.

Еще Козьма Прутков говорил: «Щелкни кобылу в нос, она махнет хвостом». Почему она машет хвостом, когда собирательный Козьма Прутков щелкал кобылу по носу? Никто не знает.

Так и в нашей области. В области, которой касается эта книга.

Не важно, с чего начинать изучение данной предметной области. Можно начинать с биологии, анатомии, устройства слухового аппарата человека. При внимательном изучении органов слуха возникает множество вопросов, самых разных, начиная с того, как это вообще может работать. Потрясающе сложная конструкция. Заканчивая философскими — зачем природа (или Бог, как кому удобнее) сделала такое приспособление. От простого изучения устройства уха можно перейти к очень сложным разделам физики — волновым теориям, применяющимся в физике плазмы, самолетостроении и т. д. Можно перейти к актуальной для современной технической цивилизации области — компрессионному сжатию и усилению сигналов, помехоустойчивости. Можно погрузиться в изучение серьезных математических проблем — прямого и обратного фурие-преобразований. Можно затронуть тему передачи, хранения и обработки сложной информации, краткосрочному и долгосрочному. Можно перейти к вопросу об «оптимальном» устройстве вычислительных машин в зависимости от типов решаемых задач: количество и тактовые частоты центральных процессоров, шины данных, оперативная и долгосрочная память, способы ввода/вывода информации. Можно посмотреть, как такой слуховой аппарат получился из простейших неорганических молекул, органических, микроорганизмов, земноводных, млекопитающих, проследить эволюцию живых организмов. Огромное, гигантское количество связей, непонятных, не решенных еще человечеством задач. И это лишь малая часть видимых задач, имеющих отношение к естественнонаучным дисциплинам. Не зря ведь говорили товарищи буддисты: «В капле воды отражается целый мир».

Рассматривая наше ухо, можно ведь начать задаваться и другими вопросами, не естественнонаучными. Например, почему мы слышим совсем не то, что фактически, физически есть в нашем мире, в окружающей среде? Причем искажения возникают настолько сильные и носящие принципиальный характер, что просто какими-то соображениями о защите кортиева органа от очень громких звуков, скажем, объяснить такое положение дел никак не получается.

Мы поистине живем в «сансаре», в некоем иллюзорном мире, в данном случае — в мире звуков, имеющем очень косвенное отношение к миру звуков в окружающем пространстве. Наш слуховой аппарат вместе с головным мозгом достраивает звуки, домысливает, создает образы, выделяет семантическую, смысловую и эмоциональную информацию. Не зря же человечество родило самый абстрактный из всех существующих видов искусств — музыку. Ведь там нет ничего конкретного, все уплывает, все бесконечно динамично. Но насколько сильно действует на нас упорядоченный каким-то образом набор звуков, музыка, даже если мы не можем выделить из нее никакой смысловой информации! Вихрь образов, эмоций, переживаний. Можно прожить целую жизнь, слушая любимое произведение.

Мы говорили сейчас просто об ухе. Слегка тронув ухо, мы улетели в серьезную физику, математику, информационные технологии, принципы формирования, работы мозга, философию и религию.

Но можно подойти и с другой стороны. Потянуть этот клубок за другую ниточку. Например, почему все древние люди так любили совершенные консонансы, а сейчас мы их любим и слушаем гораздо реже? Почему и древние индийцы, и китайцы, и греки считали музыку частью наук, религии, философии, космологии, этических норм, медицины, считали ее неотъемлемой частью науки управления большими группами людей — менеджмента, в нашей терминологии? Почему сейчас это не так? На чем они основывались? Почему обучение музыке пифагорейцами, древними индийцами и другими древними товарищами осуществлялось в закрытых школах и сектах? Что за тайные знания они там приобретали? Или такая ситуация — лишь следствие необходимости чрезвычайно упорного занятия музыкой под присмотром учителя? И что за учителя это были, что в них было такого особенного? И почему индийцы считают самым лучшим музыкальным инструментом голос человека? И зачем учат десятилетиями браминов, брахманов правильному чтению чант и мантр? По сути, ничего не значащих наборов звуков, если говорить о семантике. Чего они добиваются? Чем хороши с музыкальной точки зрения эти самые получившиеся на выходе чаны и мантры? И на кого и как они действуют? И зачем?

Десятки, сотни, тысячи вопросов, на которые нет ответа.

Это мы затронули всего лишь два хвостика, две ниточки нашего клубка знаний. Таких хвостиков — десятки, сотни, каждый из них связан с сотнями других — и так до бесконечности. А сколько еще таких клубков существует?

Вот этим-то, как мне кажется, и хороша моя книга. Она дает более-менее понятные и приемлемые ответы на какие-то простые вопросы. И рождает при этом тысячи других, в самых разных областях знания, а может быть и такие, которые и не относятся ни к какой известной сейчас области знания, ее еще стоит придумать вначале.

Держайте! Ковыряйте наш мир с помощью «глупых» вопросов — и вы увидите, какой он удивительный!

Авиценна, Ибн Сина, Абу Али Хусейн ибн Абдаллах ибн Сина (ebn-e sinâ, *тадж.* Ибни Сино, в *лат.* форме — Avicenna (Авиценна); 16 августа 980, село Афшана близ Бухары — 18 июня 1037, Хамадан) — таджикский философ, музыкант и врач, представитель восточного аристотелизма. Был придворным врачом саманидских эмиров и дайлемитских султанов, некоторое время был визирем в Хамадане. Создал более 450 трудов в 29 областях науки, в том числе и по теории музыки.

Аккорд (*франц.* accord, *итал.* accordo, от *позднелат.* accordo — согласовываю) — созвучие из трех и более разновысотных музыкальных звуков, как правило, отстоящих друг от друга на терцию.

Алдошина Ирина Аркадьевна — профессор кафедры звукорежиссуры Санкт-Петербургского Гуманитарного университета профсоюзов, доктор технических наук, председатель петербургской секции AES, почетный член международного общества AES, член Координационного Совета по акустике РАН. Автор более двухсот научных трудов (монографий, учебных пособий, статей и др.) по акустике и психоакустике. В том числе соавтор книги «Музыкальная акустика».

Амплитуда — максимальное значение смещения или изменения переменной величины от среднего значения при колебательном или волновом движении. Амплитуда для волн на струне или пружине — это расстояние и записывается в единицах длины; амплитуда звуковых обычно относится к амплитуде давления воздуха в волне, но иногда описывается как амплитуда смещения относительно равновесия. Ее логарифм обычно измеряется в децибелах (дБ).

Анатомия (от *греч.* ἀνά — вновь, сверху и τέμνω — режу, рублю) — раздел биологии, изучающий строение тела организмов и их частей на уровне выше клеточного. Также термин «анатомия» употребляется в более широком смысле: строение, устройство чего-либо, например: анатомия музыки, анатомия современного общества.

Белый шум — стационарный шум, спектральные составляющие которого равномерно распределены по всему диапазону задействованных частот. Пример «белого шума» — шум близкого водопада. Название получил от белого света, содержащего электромагнитные волны частот всего видимого диапазона электромагнитного излучения. В природе и технике чистый «белый шум» (то есть имеющий одинаковую спектральную мощность на всех частотах) не встречается (ввиду того что такой сигнал имел бы бесконечную мощность), однако под категорию «белых шумов» попадают любые шумы, спектральная плотность которых одинакова (или слабо отличается) в рассматриваемом диапазоне частот.

Бернстайн Леонард (*англ.* Leonard Bernstein; 25 августа 1918, Лоуренс, штат Массачусетс — 14 октября 1990, Нью-Йорк) — американский композитор,

пианист и дирижер. Автор многочисленных опер, мюзиклов, симфоний. Известен также как автор книг о музыке. Наиболее известное произведение — мюзикл «Вестсайдская история» (West Side Story, 1957).

Биения — явление, возникающее при наложении двух гармонических колебаний, выражающееся в периодическом уменьшении и увеличении амплитуды суммарного сигнала. Биения модулируются по амплитуде. Частота изменения амплитуды суммарного сигнала равна разности частот двух исходных сигналов. Биения возникают от того, что один из двух сигналов постоянно отстает от другого по фазе и в те моменты, когда колебания происходят синфазно, суммарный сигнал оказывается усилен, а в те моменты, когда два сигнала оказываются в противофазе, они взаимно гасят друг друга. Биения звука можно слышать при настройке струнного музыкального инструмента по камертону. Если частота струны незначительно отличается от частоты камертона, то слышно, что звук пульсирует, — это и есть биения. При совпадении высоты звука с эталонным биения полностью исчезают.

Бинауральный эффект (от *лат.* bini — два, пара и *auris* — ухо) — эффект, возникающий при восприятии звука двумя ушами одновременно. Он позволяет определить направление на источник звука, что делает звуковое восприятие объемным. Эффект состоит в том, что если человек обращен лицом к источнику звука, то звуковая волна доходит до обоих его ушей одновременно и поэтому — в одной фазе. Когда человек поворачивает голову, скажем, влево от направления на источник звука, то его правого уха звуковая волна достигает раньше, чем левого, и фазы звуковых колебаний в ушах оказываются сдвинутыми друг относительно друга. По этому сдвигу фаз мозг и определяет направление на источник звука.

Биоакустика (от *др.-греч.* βίος — жизнь и ἀκουστικός — слуховой, слушающий-ся) — область в биологии, раздел в зоологии, которые занимаются изучением звуковой сигнализации у животных и их звуковых взаимоотношений. Область биоакустики — изучение роли звука как средства передачи информации в мире живых существ, изучение всевозможных существующих в природе способов звуковой связи между живыми существами, механизмов образования и восприятия у них звуков, а также принципов кодирования и декодирования передаваемой информации в живых биоакустических системах. Биоакустика задействует зоологов, инженеров-акустиков, физиологов, психологов, лингвистов, математиков, инженеров-конструкторов, биоников и ряд других специалистов.

Брахма (*санскр.* ब्रह्मा; Brahṁā IAST) — бог творения в индуизме. Наряду с Вишну и Шивой является одним из богов Тримурти. Четыре руки Брахмы олицетворяют четыре стороны света: восток, юг, запад и север. Задняя правая рука представляет ум, задняя левая рука представляет разум, передняя правая рука — эго, и передняя левая рука — самоуверенность. Четки символизируют различные материальные субстанции, использованные в процессе сотворения Вселенной. Книга — книга Вед в одной из рук Брахмы символизирует знание. Золото ассоциируется с деятельностью; золотой лик Брахмы указывает на то, что он активно вовлечен в процесс сотворения Вселенной. Четыре лика, головы и руки олицетворяют четыре Веды: Риг, Саму, Яджур и Атхарву. Хотя Брахма является одним из трех божеств Тримурти, его культ очень мало распространен.

Брубек Дэвид (Дэйв) **Уоррен** (*англ.* David (Dave) Warren Brubeck; 6 декабря 1920, Конкорд, Калифорния, США) — американский джазовый композитор, аранжировщик, пианист, руководитель квартета «The Dave Brubeck Quartet». Выдающийся представитель кул-джаза. Одним из самых известных про-

изведений квартета Дейва Брубeka является классическая джазовая композиция «Take Five» (композитор Пол Дезмонд), записанная в 1959 году и вошедшая в альбом «Time Out». Это была первая джазовая композиция, достигшая миллиона продаж.

Будда Гаутама, Будда Шакьямуни (санскр. गौतमबुद्धः सदिधार्थ शाक्यमुनिः; 563 до н.э. — 483 до н.э.; дословно «Пробужденный мудрец из рода Шакьев или Сакьев») — духовный учитель, легендарный основатель буддизма. Получив при рождении имя Сиддхаттха Готāма (пали) / Сиддхартха Гаутāма (санскрит) («потомок Готамы, успешный в достижении целей»), он позже стал именоваться Буддой (буквально «Пробудившимся») и Верховным буддой (Sammāsambuddha). Его также называют: Татхāгата, Бхагаван, Сугата (Правильно идущий), Джина (Победитель), Локаджьештха (Почитаемый миром).

Вебер Эрнст Генрих (нем. Ernst Heinrich Weber; 24 июня 1795, Виттенберг — 26 января 1878, Лейпциг) — немецкий психофизиолог и анатом.

Гарбузов Николай Александрович (23 июня (5 июля) 1880, Москва — 3 мая 1955, там же) — советский музыкальный акустик и теоретик музыки. Доктор искусствоведения (1940).

В 1921–1931 годах возглавлял созданный при его непосредственном участии Государственный институт музыкальной науки (ГИМН), где вел исследовательскую работу. В 1923–1951 — профессор (класс музыкальной акустики), в 1933–1948 — руководитель акустической лаборатории и т.д. Основное направление исследовательской деятельности Гарбузова посвящено проблемам гармонии и природы слухового восприятия. Им впервые экспериментально доказана зонная природа слуха. На основе анализа экспериментальных данных выдвинул положение о том, что музыкальное восприятие имеет не точечный, а зонный характер; восприятие высоты, громкости, тембра, ритмики, интонационных соотношений происходит в пределах известного количественного диапазона, на протяжении которого сохраняется данное качество звука.

Гармоника — см. Обертон.

Гармония (др.-греч. ἁρμονία — связь, порядок; строй, лад; слаженность, соразмерность, стройность) — комплекс понятий теории музыки. Гармоничной называется (в том числе и в обиходной речи) приятная для слуха и логически постигаемая разумом слаженность звуков (музыкально-эстетическое понятие). Гармония как научная и учебно-практическая дисциплина изучает в том числе звуковысотную организацию музыки.

Гельмгольц Герман Людвиг Фердинанд фон (нем. Hermann von Helmholtz; 31 августа 1821, Потсдам — 8 сентября 1894, Шарлоттенбург) — немецкий физик, врач, физиолог и психолог. Он разработал математическую теорию для объяснения оттенков (тембра) звука с помощью обертонов и многие другие научные теории. Резонатор Гельмгольца представляет собой полый шар с узким отверстием и служит для анализа акустических сигналов, а также при строительстве низкочастотных звуковых колонок для усиления низких частот, или, наоборот, используется для подавления нежелательных частот в помещениях.

Гештальтпсихология (от нем. Gestalt — целостная форма или структура) — школа психологии начала XX века. Основана Максом Вертгеймером в 1912 году. Первичными данными психологии являются целостные структуры (гештальты), в принципе не выводимые из образующих их компонентов. Гештальтам присущи собственные характеристики и законы, в частности «закон группировки», «закон отношения» (фигура/фон). Гештальт (нем. Gestalt — форма, образ, структура) — пространственно-на-

глядная форма воспринимаемых предметов, чьи существенные свойства нельзя понять путем суммирования свойств их частей. Одним из ярких тому примеров является мелодия, которая узнается даже в случае, если она транспонируется в другие тональности. Гештальтпсихология возникла из исследований восприятия. В центре ее внимания — характерная тенденция психики к организации опыта в доступное пониманию целое. Например, при восприятии букв с «дырами» (недостающими частями) сознание стремится восполнить пробел, и мы узнаем целую букву.

Гуру (санскр. गुरु — достойный, великий, важный, учитель, мастер) — в индуизме и буддизме духовный наставник, учитель.

Джаз (англ. Jazz) — форма музыкального искусства, возникшая в конце XIX — начале XX века в США в результате синтеза африканской и европейской культур и получившая впоследствии повсеместное распространение. Характерными чертами музыкального языка джаза изначально стали импровизация, полиритмия, основанная на синкопированных ритмах, и уникальный комплекс приемов исполнения ритмической фактуры — свинг. Дальнейшее развитие джаза происходило за счет освоения джазовыми музыкантами и композиторами новых ритмических и гармонических моделей.

Диссонанс — см. Консонанс.

Дифракция (лат. diffractus — букв. разломанный, переломанный, огибание препятствия волнами) — явление, которое можно рассматривать как отклонение от законов геометрической оптики при распространении волн. Первоначально понятие дифракции относилось только к огибанию волнами препятствий, но в современном, более широком толковании, с дифракцией связывают весьма широкий круг явлений, возникающих при распространении волн в неоднородных средах, а также при распространении ограниченных в пространстве волн.

Доминанта (от лат. dominans — господствующий) — V ступень лада относительно тоники, одна из главных ступеней музыкального ряда. Доминантовое трезвучие относится к тональностям первой степени родства к тонике. В европейской музыке тональности V ступени всегда выделялась особая роль, доминанта означала контраст к основной тональности. Среди всех родственных тональностей доминанта считалась господствующей (отсюда название), наиболее напряженной тональностью, требующей разрешения.

Екклесиаст, также Екклезиаст, Екклесиаст (ивр. עֵקֶלְאִשֵּׁת — «кохэлет»; др.-греч. Εκκλησιαστής) — 33-я часть Танаха, 7-я книга Ктувим, название ветхозаветной библейской книги, которая в христианской Библии помещается среди Соломоновых книг. Эта книга, кроме древнееврейского оригинала, сохранилась во многих древних переводах, свидетельствующих о ее популярности.

Звукоряд (лат. vocum ordo, нем. Tonreihe или Tonleiter, англ. scale, франц. échelle, итал. scala) — в теории музыки последовательность звуков, расположенных по высоте в восходящем или нисходящем порядке. Отдельные звуки в таком ряду в теории музыки именуются ступенями (по аналогии со ступенями лестницы). Звукоряд — простейшая первичная систематизация звуков для их осмысления или изучения, устанавливающая высоту и количество каких-либо звуков независимо от их связи между собой. Может служить основой для построения различных ладов (например, в модальной музыке). В зависимости от интервалов, используемых в музыкальной системе, различают большое количество звукорядов, например: натуральный звукоряд, диатонический звукоряд (диатоника), пентатонический звукоряд (пентатоника, 5 звуков), гептатонический (гептатоника, 7 звуков) и др.

Интенсивность звука (абсолютная) — величина, равная отношению потока звуковой энергии dP через поверхность, перпендикулярную направлению распространения звука, к площади dS этой поверхности; единица измерения — ватт на квадратный метр ($Вт/м^2$).

Интервал (от *лат.* intervallum — промежуток, расстояние; разница, несходство) — в музыке соотношение между двумя звуками определенной высоты. Наименьшей единицей измерения музыкального интервала в европейской традиции считается полутон. Консонантные и диссонантные интервалы — важнейшие элементы гармонии. С одной стороны, интервал может быть представлен как абстрактная математическая величина, выраженная отношением двух чисел, с другой стороны — как элемент специфически музыкальной логики, категория гармонии, выраженная в буквенной или графической нотации. Интервалы классифицируются: 1. по взятию: одновременному (гармонический, или вертикальный, интервал) или последовательному (мелодический, или горизонтальный, интервал); 2. по объему (количеству) заключенных в них ступеней. Число, обозначающее количество ступеней в интервале, также является кратким обозначением этого интервала в музыкальной грамоте — прима, секунда, терция, кварта, квинта, секста, септима; 3. по «качеству» (количеству заключенных в интервале тонов и полутонов при известном количестве ступеней). «Качество» интервала определяется словами «большая» (сокращенно б.), «малая» (м.), «чистая» (ч.), «увеличенная» (ув.), «уменьшенная» (ум.), «дважды увеличенная» (дв. ув.) и «дважды уменьшенная» (дв. ум.). Качественная характеристика интервала служит дополнением его количественной характеристики. Большими и малыми могут быть секунды, терции, сексты и септимы. Чистыми могут быть примы, кварты, квинты и октавы. Увеличенными и уменьшенными могут быть любые интервалы (за исключением уменьшенной примы, которая не может существовать на практике).

И Цзин, Книга Перемен (более правильно Канон Перемен; Yi Jing. Также известна под названием «Чжоу И», предположительно по названию эпохи Чжоу, во время которой была написана наиболее авторитетная редакция. По другому предположению, иероглиф Чжоу понимается как «цикл, кругооборот», иероглиф И как «перемены», таким образом «Чжоу И» означает цикличность перемен. И Цзин является наиболее ранним из известных истории китайских философских текстов. Принят конфуцианской традицией во II веке до н.э. как один из канонов конфуцианского Пятикнижия. Название Книги Перемен объясняется тем, что главная идея, лежащая в ее основе, — это идея изменчивости. В незапамятные времена, еще до возникновения письменности, эта идея была почерпнута людьми из наблюдения за сменой света и тьмы в мире, окружающем человека. На основе этой идеи была построена теория гадания о деятельности человека: идет ли эта деятельность вразрез с ходом мирового свершения, или она гармонически включается в мир, то есть несет ли она несчастье или счастье, как это называется на языке технических терминов «Книги Перемен». В настоящее время многими учеными естественнонаучных и гуманитарных дисциплин (физика, биология, генетика, психология и т.д.) рассматривается как сжатый математический информационный объект, который может помочь в разрешении множества сложных и крайне сложных задач.

Интерференция волн — взаимное усиление или ослабление амплитуды двух или нескольких когерентных волн, одновременно распространяющихся в пространстве. Сопровождается чередованием максимумов и минимумов (пучностей) интенсивности в пространстве. Результат интерферен-

ции (интерференционная картина) зависит от разности фаз накладывающихся волн. Интерферировать могут все волны, однако устойчивая интерференционная картина будет наблюдаться только в том случае, если волны имеют одинаковую частоту и колебания в них не ортогональны.

Казальс-и-Дефилльо Пабло (кат. Pau Casals i Defilló; 29 декабря 1876, Вендрель, провинция Таррагона — 22 октября 1973, Сан-Хуан, Пуэрто-Рико) — каталонский виолончелист, дирижер, композитор, музыкально-общественный деятель. Один из крупнейших исполнителей XX в. С 1957 года в различных странах проводятся международные конкурсы имени Казальса.

Камертон (нем. Kammerton — «комнатный звук») — небольшой портативный прибор, точно и ясно издающий звук определенной высоты со слабыми гармоническими призвуками. Стандартный камертон издает звук ля 1-й октавы частотой 440 Гц. В исполнительской практике применяется для настройки музыкальных инструментов.

Кварта (лат. quarta — четвертая) — музыкальный интервал шириной в четыре ступени, обозначается цифрой 4. Чистая кварта соответствует отношению частот $4/3$.

Квинта (лат. quinta — пятая) — музыкальный интервал шириной в пять ступеней, обозначается цифрой 5. Чистая квинта соответствует отношению частот $3/2$.

Кирхер Афанасий (нем. Athanasius Kircher; 2 мая 1602, Гайза (Рён), около Фульды — 27 ноября 1680, Рим) — немецкий ученый-энциклопедист и изобретатель. Из его сочинений по физике и математике известны «Ars magna lucis et umbrae» (1646), «Musurgia universalis» (о звуке и музыке, в т.ч. содержит теорию аффектов, 1650).

Кластеры (англ. cluster — скопление) — объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определенными свойствами. В музыке — многозвучие, дающее или сплошное заполнение акустического пространства, или образование шума.

Клатраты (от лат. clatratus — обрешеченный, закрытый решеткой) — соединения включения. Образованы включением молекул вещества («гостя») в полости кристаллической решетки, образованной молекулами другого типа («хозяевами») (решетчатые клатраты), либо в полость одной большой молекулы-хозяина (молекулярные клатраты).

Клёзмер (из идиш кле(й)змер, сложносоставное слово из двух корней, входящих к ивр. клей — инструменты и земер — напев) — традиционная нелитургическая музыка восточноевропейских евреев и особенный стиль ее исполнения. Исполнители музыки в этом стиле — клёзмеры (ед. ч. кле(й)змер, мн. ч. клезмбрим/клёзмерс/клёзмер).

Консонанс и диссонанс (франц. consonance, от лат. consonantia — созвучие, согласное звучание, и франц. dissonance, от лат. dissonantia — нестройность, нестройное звучание) — противоположные понятия теории музыки, характеризующие слияние или неслияние в восприятии одновременно звучащих тонов, а также сами созвучия (интервалы, аккорды), воспринимаемые как слитные и неслитные. То есть диссонанс — это неприятное для слуха звучание, а консонанс — приятное.

Лад — система взаимосвязей звуков, выраженная в звукоряде. Последовательность ступеней лада образует его гамму. Необходимое условие существования лада — качественное различие его ступеней. Каждая из них несет особую ладовую функцию, которая обуславливается тяготением неустойчивых звуков к устойчивым (опорным). Основным устоем служит тоника, определяющая тональность лада.

- Лао Цзы** (Старый Младенец, Мудрый Старец; *кит. упр.* 老子, *пиньинь:* Lǎo Zi) — древнекитайский философ VI–V веков до н.э., которому приписывается авторство классического даосского философского трактата «Дао Дэ Цзин». Современная наука подвергает сомнению историчность Лао Цзы, тем не менее в научной литературе он часто определяется как основоположник даосизма.
- Линейная функция** — функция вида $f(x)=kx+b$ (для функции одной переменной). Функции, не являющиеся линейными, называются нелинейными.
- Люй-Люй** (*кит.* — 12 люй; люй — мера, строй) — в музыке 12-ступенная звуковая система, символизировавшая философско-космологические, эстетические и этические представления в Др. Китае.
- Майкопар Самуил Моисеевич** (18 декабря 1867, Херсон — 8 мая 1938, Ленинград) — известный пианист и композитор, преподаватель Петроградской консерватории, музыкальный писатель. Караим. Разносторонне одаренный музыкант и писатель. Большую известность получила его книга «Музыкальный слух».
- Максим Хайрем Стивенс** (*англ.* Hiram Stevens Maxim; 5 февраля 1840, Сангerville, штат Мэн — 24 ноября 1916, Стретем, Великобритания) — британский изобретатель и оружейник американского происхождения, создатель одного из самых знаменитых пулеметов — пулемета Максима.
- Махабхарата** (*санскр.* महाभारत, mahābhārata IAST, «Великое сказание о потомках Бхараты») — древнеиндийский эпос, одно из крупнейших литературных произведений в мире. «Махабхарата» представляет собой сложный, но органичный комплекс эпических повествований, новелл, басен, притч, легенд, лиродидактических диалогов, дидактических рассуждений богословского, политического, правового характера, космогонических мифов, генеалогий, гимнов, плачей, объединенных по типичному для больших форм индийской литературы принципу обрамления, состоит из восемнадцати книг (парв) и содержит более 75 000 двустиший (шлок), что в несколько раз длиннее «Илиады» и «Одиссеи» вместе взятых. «Махабхарата» — источник многих сюжетов и образов, получивших развитие в литературе народов Южной и Юго-Восточной Азии. В индийской традиции считается «пятой Ведой». Одно из немногих произведений мировой литературы, которое само о себе утверждает, что в нем есть всё на свете.
- Менухин Иегуди** (*англ.* Yehudi Menuhin; 22 апреля 1916, Нью-Йорк — 12 марта 1999, Лондон) — выдающийся американский скрипач и дирижер. Музыкант классического репертуара, Менухин в 1980-х годах записал несколько джазовых композиций вместе со Стефаном Грапелли, несколько концертов восточной музыки — с ситаристом Рави Шанкаром.
- Музыка** (*греч.* μουσική, прилагательное от *греч.* μουσα — муза) — искусство, средством воплощения художественных образов для которого является звук, особым образом организованный во времени.
- Нейрофизиология** — раздел физиологии животных и человека, изучающий функции нервной системы и ее основных структурных единиц — нейронов. Она тесно связана с нейробиологией, психологией, неврологией, клинической нейрофизиологией, электрофизиологией, этологией, нейроанатомией и другими науками, занимающимися изучением мозга.
- Нелинейная функция** — см. Линейная функция.
- Нонаккорд** — аккорд, состоящий из пяти звуков, которые можно расположить по терциям (например: до, ми, соль, си, ре). Обозначается цифрой 9. В сжатом расположении (то есть будучи расположен по терциям) наонаккорд содержит четыре терции, три квинты, две септимы и одну нону, три трезвучия и два септаккорда. Нонаккорд может быть рассмотрен также как септаккорд с добавлением ноны от его основного тона.

Нота (лат. *pōta* — знак, метка) — в музыке графическое обозначение звука музыкального произведения, один из основных символов современной музыкальной нотации. Вариации в изображении ноты, а также сочетания с другими символами позволяют задать такие характеристики обозначаемого нотой звука как высота, длительность и порядок исполнения по отношению к другим звукам. Часто слово «нота» используют как синоним для обозначаемого им понятия «звук», что является не совсем правильным с точки зрения логики.

Обертон (нем. *Oberton* — верхний тон) — в акустике призвук, входящие в спектр музыкального звука; высота обертонов выше основного тона (отсюда название). Наличие обертонов обусловлено сложной картиной колебаний звучащего тела (струны, столба воздуха, мембраны, голосовых связок и т.д.); частоты обертонов соответствуют частотам колебания его частей. Обертоны бывают гармоническими (гармоники) и негармоническими. Частоты гармонических обертонов кратны частоте основного тона (гармонические обертоны вместе с основным тоном также называются гармониками); в реальных физических ситуациях (например, при колебаниях массивной и жесткой струны) частоты обертонов могут заметно отклоняться от величин, кратных частоте основного тона, — такие обертоны называются негармоническими. Ввиду исключительной важности для музыки именно гармонических обертонов вместо «гармонический обертон» в музыкально-теоретической (но не в физической) литературе часто пишут «обертон» без каких-либо уточнений, но такая трактовка является неверной.

Октава (от лат. *octāva* — восьмая) — музыкальный интервал, в котором соотношение частот между звуками составляет $1/2$ (то есть частота высокого звука в 2 раза больше низкого). Субъективно на слух октава воспринимается как устойчивый, базисный музыкальный интервал. Два последовательных звука, отстоящие на октаву, воспринимаются очень похожими друг на друга, хотя явно различаются по высоте. Чаще всего звуки октавы называются одним названием, различающимся дополнениями. Например: до 1-й октавы, до 2-й октавы.

Полифония (от греч. *πολύς* — многочисленный и *φωνή* — звук) — склад многоголосной музыки, характеризуемый одновременным звучанием, развитием и взаимодействием нескольких голосов (мелодических линий, мелодий в широком смысле), равноправных с точки зрения композиционно-технической (равноправные участники многоголосной фактуры) и музыкально-логической (равноправные носители «музыкальной мысли»).

Психоакустика — наука, изучающая психологические и физиологические особенности восприятия звука человеком. В аспекте сугубо музыкальном основными задачами психоакустики являются следующие: понять, как система слухового восприятия человека расшифровывает тот или иной звуковой образ; установить основные соответствия между физическими стимулами и слуховыми ощущениями; выявить, какие именно параметры звукового сигнала являются наиболее значимыми для передачи семантической (смысловой) и эстетической (эмоциональной) информации.

Равномерно темперированный строй (12-нотный), РТС — музыкальный строй, при котором каждая октава делится на математически равные интервалы, на двенадцать равных полутонов. Такой строй господствует в европейской профессиональной музыке приблизительно с XVIII в. вплоть до нашего времени.

Рага (санскр. цвет, настроение) — музыкально-эстетическая категория, охватывающая правила и предписания для построения крупной музыкальной формы в рамках индийской классической музыки. В более узком смысле

рага — это мелодия, выстроенная в соответствии с классическим каноном. Рага неразрывно связана с другой категорией — тала (теорией музыкального ритма). Хотя рага с трудом поддается адекватному определению, она далеко не исчерпывается лишь указанием на используемый звукоряд. Прежде всего, каждая рага призвана передать определенную эмоцию или настроение (раса). Кроме того, для каждой раги имеется ряд технических предписаний, регламентирующих ее звуковысотный состав, иерархию ладовых ступеней, особенности извлечения характерных тонов и их орнаментацию (гамакам), а кроме того, и специфические мелодические обороты, попевки (пакад). Наиболее явной характеристикой раги являются ее восходящий (ароха) и нисходящий (авароха) мелодические формульные обороты. При этом ароха и авароха некоторой раги могут иметь различающееся количество ступеней. В индийской музыке исторически сложились две различные музыкальные системы (а также кодексы раг): тхаат в музыке Хиндустани и мелакарта в музыке Карнатаки. Имея общие сходные черты, эти две системы существенно различаются как по содержанию, так и по форме (например, раги, имеющие одно и то же название в обеих системах, могут не иметь ничего общего между собой по сути).

Рамаяна (санскр. रामायण — «Путешествие Рамы») — древнеиндийский эпос на санскрите, автором которого в традиции индуизма принято считать легендарного мудреца Валмики. Является одним из важнейших священных текстов индуизма. В Рамаяне повествуется история Рамы (одно из четырех одновременных воплощений Вишну, остальные три — его братья), чью жену Ситу похищает Рavana — царь-ракшаса Ланки. В эпосе освещаются темы человеческого существования. В поэме содержатся учения древних индийских мудрецов, которые представлены посредством аллегорического повествования в сочетании с философией.

Рибо Теодюль (франц. Théodule Ribot; 18 декабря 1839, Генган — 9 декабря 1916, Париж) — выдающийся французский психолог, педагог, член Французской академии.

Сансара (санскр. संसार — переход, череда перерождений, жизнь) — круговорот рождения и смерти в мирах, ограниченных кармой, одно из основных понятий в индийской философии: душа, тонущая в «океане сансары», стремится к освобождению (мокше) и избавлению от результатов своих прошлых действий (кармы), которые являются частью «сети сансары». Это одно из центральных понятий в индийских религиях — индуизме, буддизме, джайнизме и сикхизме. Каждая из этих религиозных традиций дает свои интерпретации понятия сансары. В большинстве традиций и философских школ сансара рассматривается как неблагоприятное положение, из которого необходимо выйти.

Свара. — В традиционной индийской музыке применяется 7 главных тонов (свара), а также 15 дополнительных нот (шрути). Ноты свара обозначаются начальным слогом санскритского наименования: са (схагра, шадджа), ри (рисхава, ришабха), га (гандхара), ма (мадхьяма), па (пангама, панчама), дха (дхавата, дхайвата), ни (нисхада, нишада). Шрути (санскр., от шру — слышать) — минимальное расстояние между двумя звуками, а также принцип организации звукоряда в индийской классической музыке, подразумевающий деление его на 22 не равных по величине интервала. Впервые понятие Шрути встречается в «Натьяшастре» Бхараты (первые века н.э.). Шрути трактуется как наименьший интервал и как средство муз. выразительности, способствующее выявлению того или иного эмоционально-психологического состояния, — раса. Каждый Шрути имеет

название, соответствующее характеру своего раса: неизменный, блистающий, желанный, прекрасный и т.д. Шрути делятся на 5 групп (джати): жгучие, широкие, нейтральные, нежные и жалобные. Индийская философская мысль, для которой характерно синкретическое восприятие мира, включает каждый из Шрути в целостную систему мироздания, где им соответствуют определенные планеты, цвета спектра, божества и т.д. Большое значение имеет соотношение между 15 Шрути, располагающимися в пределах октавы, и 7 основными ступенями звукоряда (свара). Каждая ступень (свара) включает определенное количество Шрути: шадджа (1-я свара) включает 4 Шрути, ришабха (2-я) — 3, гандхара (3-я) — 2, мадхьяма (4-я) — 4, панчама (5-я) — 4, дхайвата (6-я) — 3, нишада (7-я) — 2.

Сегрегация — изменение физического состояния неоднородной среды.

Секста (*лат. sexta* — шестая) — музыкальный интервал шириной в шесть ступеней, обозначается цифрой 6.

Секунда (*лат. secunda* — вторая) — музыкальный интервал шириной в две ступени, обозначается цифрой 2.

Септаккорд — аккорд, состоящий из четырех звуков, которые расположены или могут быть расположены по терциям. Интервал между двумя крайними звуками септаккорда равен септимеру, отсюда его название. С точки зрения классической музыки, добавление к трезвучию четвертого звука делает весь аккорд неустойчивым и диссонирующим, поэтому септаккорды часто использовались для придания музыке динамизма.

Септима (*лат. septima* — седьмая) — музыкальный интервал шириной в семь ступеней, обозначается цифрой 7.

Синестезия (*греч. συναίσθησις* — одновременное ощущение, совместное чувство) — в психологии явление восприятия, когда при раздражении одного органа чувств (вследствие иррадиации возбуждения с нервных структур одной сенсорной системы на другую) наряду со специфическими для него ощущениями возникают и ощущения, соответствующие другому органу чувств. Примеры: «цветной» слух, «цветное» обоняние, шелест запахов. Феномен синестезии известен науке на протяжении уже трех столетий. Пик интереса к ней пришелся на рубеж XIX и XX веков. Тогда смешением чувств заинтересовались не только медики, но и люди искусства. Например, были популярны концерты «музыка + свет», в которых использовался специальный орган, чьи клавиши извлекали не только звуки, но и свет. В частности, поэма Скрябина «Прометей».

Слуховой порог (порог слышимости) — минимальная величина звукового давления, при которой звук данной частоты может быть еще воспринят ухом человека. Величину порога слышимости принято выражать в децибелах, принимая за нулевой уровень звукового давления $2 \times 10^{-5} \text{ Н/м}^2$ или $20 \times 10^{-6} \text{ Н/м}^2$ при частоте 1 кГц (для плоской звуковой волны). Порог слышимости зависит от частоты звука. При действии шумов и других звуковых раздражителей порог слышимости для данного звука повышается, причем повышенное значение порога слышимости сохраняется некоторое время после прекращения действия мешающего фактора, а затем постепенно возвращается к исходному уровню. У разных людей и у одних и тех же лиц в разное время порог слышимости может различаться. Он зависит от возраста, физиологического состояния, тренировки.

Соснора Виктор Александрович (28 апреля 1936, Алупка) — русский поэт, прозаик, драматург, обладатель многочисленных литературных премий.

Спектр (*лат. spectrum* — видение) — в физике распределение значений физической величины (обычно энергии, частоты или массы). Графическое пред-

ставление такого распределения называется спектральной диаграммой. В научный обиход термин «спектр» ввел Ньютон в 1671–1672 годах для обозначения многоцветной полосы, похожей на радугу, которая получается при прохождении солнечного луча через треугольную стеклянную призму.

Субдоминанта (от *лат.* sub — под и *dominans* — господствующий; *франц.* sousdominante, *нем.* Subdominante, Unterdominante) — в музыке IV ступень лада относительно тоники, одна из главных ступеней ладогармонического ряда, находящаяся на тон ниже доминанты; обозначается римской цифрой IV или латинской буквой S.

Тартини Джузеппе (*итал.* Giuseppe Tartini; 8 апреля 1692, Пирано — 26 февраля 1770, Падуя) — итальянский скрипач и композитор. По мнению известного скрипача Давида Ойстраха, «Тартини принадлежит к числу корифеев итальянской скрипичной школы XVII века, искусство которых сохраняет свое художественное значение и по сей день». Тартини внес существенный вклад в дальнейшее развитие искусства игры на скрипке. Ему приписывают открытие акустического явления, заключающегося в том, что два консонирующих верхних звука дают нижний отзвук, с ними консонирующий (напр. малая терция *ми-соль* дает отзвук *до* на расстоянии децимы от верхней ноты *ми*). Эти так называемые комбинационные разностные тоны, или тоны Тартини, разработаны впоследствии Гельмгольцем.

Тембр (*франц.* timbre — колокольчик, метка, отличительный знак) — колористическая (обертоновая) окраска звука; одна из специфических характеристик музыкального звука (наряду с его высотой, громкостью и длительностью). По тембрам дифференцируют (отличают друг от друга) звуки одинаковой высоты и громкости, но исполненные на различных инструментах, разными голосами, или же на одном инструменте, но разными способами, штрихами и т.п.

Терция (*лат.* *tertia* — третья) — музыкальный интервал шириной в три ступени, обозначается цифрой 3. Чистой терции соответствует отношение частот звуков $5/4$ и $6/5$.

Тональность — в русской терминологии высотное положение лада, а также ладовая система на определенной высоте, то есть ладотональность. Термин применяется также для обозначения функциональной мажорно-минорной ладовой системы (см. Лад).

Тоника — первая и главная ступень лада, к которой тяготеют все остальные ступени. Тоника (или тоническое трезвучие) — трезвучие, построенное на первой ноте лада по его ступеням. Тоническое трезвучие — самый устойчивый аккорд лада.

Физика (от др.-греч. φύσις — природа) — область естествознания, наука, изучающая наиболее общие и фундаментальные закономерности, определяющие структуру и эволюцию материального мира. Законы физики лежат в основе всего естествознания. Термин «физика» впервые появился в сочинениях одного из величайших мыслителей древности — Аристотеля, жившего в IV в. до н.э. Первоначально термины «физика» и «философия» были синонимичны, поскольку обе дисциплины пытаются объяснить законы функционирования Вселенной. Однако в результате научной революции XVI в. физика выделилась в отдельное научное направление.

Флажолет (*старофр.* flageolet — флейта) — прием игры на музыкальном инструменте, заключающийся в извлечении звука-обертона. Также флажолетом называется сам извлекаемый звук-обертон. На струнных инструментах выполняется путем частичного прижатия струны в точке деления ее длины на 2 (высота звучания струны повышается на октаву), на 4 (2 октавы) и т.д.

Форманта — термин фонетики, обозначающий акустическую характеристику звуков речи (прежде всего гласных), связанную с уровнем частоты голосового тона и образующую тембр звука. Термин «форманта» обозначает определенную частотную область, в которой вследствие резонанса усиливается некоторое число гармоник тона, производимого голосовыми связками, то есть в спектре звука форманта является достаточно отчетливо выделяющейся областью усиленных частот, определяемой по усредненной частотной величине. Фактически феномен форманты есть проявление работы активного полосового фильтра в составе речевого тракта. Принятое обозначение форманты — F. Считается, что для характеристики звуков речи достаточно выделения четырех формант — F_I, F_{II}, F_{III}, F_{IV}, которые нумеруются в порядке возрастания их частоты. Для разных звуков речи характерны определенные частотные диапазоны формант. В большинстве случаев для различения гласных звуков достаточно первых двух формант, однако практически всегда количество формант в спектре звука больше двух, что указывает на более сложные связи между артикуляцией и акустическими характеристиками звука, чем при условии рассмотрения только двух первых формант.

Термин «форманта» часто распространяют и на звуки музыкальных инструментов.

Forster, Cris (born 1948, Brazil) is a brilliant composer, musician, restorer and manufacturer of completely new musical instruments, including those in "pure musical tunings." Scientist, researcher, popularizer. Winner of numerous state and private awards. Founder of The Chrysalis Foundation, America. Author of the book "Musical Mathematics: on the art and science of acoustic instruments," which is used as a textbook in the largest universities and libraries in the world. Unfortunately, it has not yet been translated into Russian.

Форстер Крис (англ. Cris Forster; 1948, Бразилия) — блестящий композитор, музыкант, реставратор и изготовитель совершенно новых музыкальных инструментов, в том числе и в «чистых музыкальных строях». Ученый, исследователь, популяризатор. Обладатель многочисленных государственных и частных наград. Основатель фонда The Chrysalis Foundation, Америка. Автор книги «Музыкальная математика (об искусстве и науке акустических инструментов)» («Musical Mathematics on the art and science of acoustic instruments»), которая находится в качестве учебного пособия в крупнейших университетах и библиотеках мира. К сожалению, до сих пор не переведена на русский язык.

Фурье Жан Батист Жозеф (франц. Jean Baptiste Joseph Fourier; 21 марта 1768, Осер, Франция — 16 мая 1830, Париж) — французский математик и физик. Преобразование Фурье — операция, сопоставляющая функции вещественной переменной другую функцию вещественной переменной. Эта новая функция описывает коэффициенты («амплитуды») при разложении исходной функции на элементарные составляющие — гармонические колебания с разными частотами.

Преобразование Фурье функции f вещественной переменной является интегральным преобразованием и задается следующей формулой:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx.$$

Фу Си (кит. упр. 伏羲, пиньинь fúxí или 宓戏, 虞羲) (иначе Паоси), Тайхао (кит. 太昊) — легендарный первый император Китая (Поднебесной), божество — повелитель Востока. По преданию, Фу Си считался владыкой Востока и представлялся существом с телом змеи или дракона, но с человеческой головой. Фу Си считается изобретателем (наряду с множеством других вещей) китайской иероглифической письменности, создавшим первые 8 триграмм, ставших основой для письма и китайской учености. Эти письменные знаки Фу Си начертал, увидев схожие рисунки и узоры на спине крылатого дракона, выплывшего из реки Хуанхэ. Фу Си изобрел музыку и измерительные инструменты, научил людей приручать диких

зверей и заниматься шелководством. Согласно принятой конфуцианской модели летоисчисления, Фу Си правил с 2852 по 2737 г. до н.э. Он правил 115 лет.

Хуан-ди, Желтый император (*пиньинь* huángdì) — легендарный правитель Китая и мифический персонаж, который считается также основателем даосизма и предком всех китайцев. Один из пяти легендарных императоров древнейшего периода истории Китая, относящегося к третьему тысячелетию до н.э. Традиционно временем его жизни в Китае называют период ок. 2600 г. до н.э. Его помощник по его указаниям создал китайский традиционный музыкальный строй Люй-Люй.

Частота — физическая величина, характеристика периодического процесса, равная числу полных циклов, совершенных за единицу времени.

Чистая кварта — интервал в четыре ступени (два с половиной тона). Обозначается числом 4, является совершенным консонансом, однако в зависимости от своего положения в ладу может звучать достаточно неустойчиво.

Шива (*санскр.* शिवि, śiva IAST — благой, милостивый) — в индуизме олицетворение разрушительного начала Вселенной и трансформации (созидания); одно из божеств верховной триады (тримурти), наряду с творцом Брахмой и поддержателем Вишну. Согласно «Шива-пуране», является создателем и Вишну, и Брахмы. Олицетворяет одновременно разрушительное и созидательное начала. Пять божественных ролей Шивы: создание, поддержка, растворение, сокрытие и дарование благодати. Шива с помощью космического танца, космических вибраций трансформировал изначальный непроявленный звук в проявленный.

Шрути — см. Свара.

Hi-Fi (от *англ.* High Fidelity — высокая точность, высокая верность) — термин, означающий, что воспроизводимый звук очень близок к оригиналу.

Hi-End (от *англ.* High End) — маркетинговый термин, обозначающий высочайший («элитный») класс, как правило, звукоусиливающего аппаратного и программного обеспечения. В отличие от Hi-Fi, в номенклатуре современной радиоэлектроники для понятия «Hi-End» отсутствуют регламентирующие ГОСТы или другие характеристики, способные квалифицировать Hi-End тем или иным образом. Заявляемые производителем товары класса Hi-End, как правило, имеют в своем составе только высококачественные компоненты, использование которых в некоторых случаях бывает экономически необоснованно, а жаль.

Благодарности и использованные материалы

Вартанян И.А.	«Звук, слух, мозг»
Алдошина И.А., Приттс Р.	«Музыкальная акустика»
Алдошина И.А.	Статьи из журнала «Звукорежиссер»
Майкопар С.М.	«Музыкальный слух»
Сивухин Д.В.	«Общий курс физики»
Дейв Бенсон	«Музыка: Взгляд с точки зрения математики»
Дэвид Мартин, Джейми Ангус	«Акустика и психоакустика»
Куликов И.Ю., Куликов А.Ю.	«Возрождение музыкальной симметрии», «Реабилитация пифагорейского строя»
Тейлор Ч.	«Физика музыкальных звуков»
Норман Уэйнбергер	«Музыка и мозг»
Дэниел Левитин	«Это вот твой мозг на музыке»
Самбурская А.А.	«Музыка интеллекта»
Дон Кэмпбелл	«Эффект Моцарта»
«Энциклопедия Китая» под редакцией Кобзева А.И., Еремеева В.Е. и др.	
Еремеев В.Е.	«Древнекитайское учение о системе 12 люй»
Крис Форстер	«Музыкальная математика»
Рави Шанкар	«Моя музыка, моя жизнь»
Бережанский П.Н.	«Абсолютный музыкальный слух»
Гарбузов Н.А.	«Зонная природа звуковысотного слуха»
Владимир Юровский	OpenSpace.ru, об абсолютном слухе, Материалы Википедии, статьи из «Музыкальной энциклопедии» в 6 тт. и другие материалы

сайты: MuzDarBlog <http://www.sanpc.ru/>
<http://www.sozvuchie.org>
<http://estetika-bio.narod.ru>
http://brainin.org/Method/graphics_ear-training_ru.pdf и др.

Особую благодарность за помощь при коррекции материала части «Анатомия»
хочу выразить Юрию Анатолиевичу Петрову,
Assistant Professor of Psychology,
Северо-Восточный Университет, Бостон

Также выражаю признательность Юлии Бурмистровой
и другим близким людям за терпение

В издательстве «БОСЛЕН» также вышли книги **Алексея Насретдинова**
в научно-популярной серии для детей «Пытливый ум»:
«Буравчик на звуковых волнах. Что мы слышим и как это звучит?»,
«Буравчик в Греции. Путешествие в историю человечества».
Торопитесь приобрести!

АЛЕКСЕЙ НАСРЕТДИНОВ

Физика и анатомия музыки

Насретдинов А. А.

Н31 Физика и анатомия музыки / Алексей Насретдинов. —
М.: Бослен, 2015. — 224 с.

УДК 78.01

ББК 85.31

ISBN 978-5-91187-247-2

Запрещается полное или частичное использование
и воспроизведение текста и иллюстраций в любых формах
без письменного разрешения праволадельца

© Насретдинов А., 2012

© Шмелева-Найман Е., иллюстрации, 2012

© Кудря-Бирюкова Ю., оформление, 2012

Технолог М.Кырбаш

Оператор компьютерной верстки Л.Иванова

Корректор Н.Петрова

Подписано в печать 08.06.2015. Формат 70×100/16.

Тираж 1000 экз. Заказ № 3906.

ООО «Бослен», 105082, г. Москва,

Бакунинская ул., д. 71, стр. 10

тел.: (495) 971-89-09 e-mail: info@boslen.ru

Информация в Интернете: www.boslen.ru

По вопросам приобретения, распространения,

сотрудничества обращайтесь по телефонам:

(495) 971-89-09, (495) 902-00-69

e-mail: ivstepanova@boslen.ru

Отпечатано с готовых файлов заказчика

в АО «Первая Образцовая типография»,

филиал «Ульяновский Дом печати»

432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 14

Сейчас многие, как в эпоху Возрождения, с удовольствием занимаются не своим делом. Вот и физик А. Насретдинов попытался применить известные постулаты своей науки к любимому искусству музыки. И, похоже, получилось!

«Элементарная теория музыки глазами влюбленного в музыку физика» — так бы назвал я эту книгу. Конечно, это не «анатомия музыки», как написано на обложке. Предмет, лежащий в основе книги, позволяет увидеть связи и закономерности между основной частью элементов музыки и проследить их историческое развитие.

Книга написана серьезно, но в то же время и с юмором.

В общем, «Физика и анатомия музыки» для тех, кто хочет блеснуть эрудицией, но одновременно — глубже проникнуть в святая святых звуков и их соединений. Может быть, это начало современного «физического музыковедения»?

Евгений Дуков,

*доктор философских наук, профессор,
член Союза композиторов Москвы и России,
Президент Гильдии музыковедов*

