

Л. В. Авдеев, Ю. И. Варивода, В. М. Дубовик, П. Б. Иванов

# **РОЖДЕНИЕ ЗВУКОРЯДА**

**Из Чего Делают Музыку**

Санкт-Петербург  
BODlib  
2006

**УДК 781.15**

**ББК 1**

**A 18**

**Л. В. Авдеев, Ю. И. Варивода, В. М. Дубовик, П. Б. Иванов**

Рождение звукоряда. Из чего делают музыку. — Санкт-Петербург: BODlib, 2006. — 92 с.

**ISBN 5-902882-43-5**

В истории музыки известно большое число различных звуковых систем — звукорядов. С древнейших времен их возникновение объяснялось математическими соотношениями между музыкальными звуками. В этой книге на популярном уровне излагается история развития теоретических представлений о строении звукорядов, в сопоставлении с историей музыки. Описаны ранние формы звукорядности, комбинаторные математические строи, а также двенадцатиступенный темперированный строй — основа современной музыки. Излагаются основные положения современной теории звуковысотности, опирающейся на психологическую теорию деятельности, теорию информации, квантовую механику и общую теорию иерархий. Дано описание нового универсального строя — девятнадцатиступенного, указаны перспективы развития звуковысотных систем. Чтение книги не требует предварительных музыкальных знаний; математическая сторона изложения опирается лишь на элементарные сведения, полученные в средней школе. Книга полезна всем, кто интересуется приложениями математики и любит музыку.

**Издание выпущено в рамках проекта  
«Книга по требованию»**

**ISBN 5-902882-43-5**

© П.Б.Иванов, 2006

© BODlib, 2006

Вне нас и в нас едино бытие —  
Душа всему, что движется навстречу,  
Свет в звуке, и подобье звука в свете,  
И в каждой мысли ритм, и всюду радость.  
По мне бы, право, было невозможно  
Не возлюбить всего в обширном мире,  
Где ветерок поет, а тихий воздух  
Есть Музыка, уснувшая на струнах.

*Сэмюэль Кольридж*

Читатель мой, прошу сей труд принять  
По-доброму, то есть — его понять.

*Бен Джонсон*



## ВВЕДЕНИЕ

Бывают минуты, — особенно тогда, когда я слишком зачитываюсь великим Себастьяном Бахом, — что числовые соотношения в музыке и таинственные правила контрапункта вызывают во мне какой-то внутренний ужас. О, музыка! С таинственным трепетом, даже с ужасом произношу твоё имя. Ты — выраженный в звуках праязык природы.

*Э. Т. А. Гофман*

Чем более стараются подойти к искусству с попытками объяснить его приемы научно, тем загадочнее и необъяснимее кажутся эти приемы.

*А. Блок*

Испокон веков люди стремились понять себя. И, может быть, самым загадочным казалось им необыкновенно сильное воздействие искусства на чувства, мысли и дела человека — будь то неискушенный обыватель или утонченный эстет, простолюдин или аристократ, раб или свободный, горожанин или селянин, жизнелюб или мизантроп. Искусство не знает границ, ломает рамки национальных, религиозных или сословных представлений, обычаев и традиций, — искусство соединяет эпохи. Сколько раз пытались сформулировать его законы, дать правила, следование которым было бы обязательным для всякого артиста, художника, поэта... Все тщетно! — проходит время, и то, что казалось странным и противоестественным, вдруг превращается в обычное и разумеющееся само собой. Тем интереснее для человека познать причины таинственной неуловимости искусства, проникнуть в суть его движения от одной вершины к другой.

Пожалуй, наиболее доступным объектом исследования казалась музыка. В самом деле, здесь вроде бы нет произвольности цветов и оттенков живописи, огромной смысловой насыщенности прозаического и поэтического слова, переменчивой пластики человеческого

тела, разнообразия материалов и форм скульптуры и зодчества. Есть отчетливо ощущаемое движение по ступенькам музыкальной «лестницы» — звукоряда, состоящего из относительно небольшого числа нот. Остается только найти правила, которым подчинено следование одной ноты за другой в мелодии — и сочетание нот по вертикали, в гармонии... Но уже почти три тысячи лет продолжается поиск — и не видно ему конца. Почему? Да просто потому, что музыка не стоит на месте, она живет, развивается. И сам набор звуков, из которых ее «делают», изменялся вместе с человеком, с его потребностями, представлениями о мире, с обществом, в котором он живет.

Долгое время в теории музыки и музыкальной акустике считалось, что законы музыкальной мысли порождаются чем-то внешним по отношению к человеку, что проистекают они из физиологии слуха, возможностей музыкальных инструментов или из внутренней логики звуковых последовательностей. Лишь в последние годы становится ясно, что изучение «материала» музыки требует познания человеком себя — своей физиологии, психологии, культуры.

Мы попытаемся рассказать о том, как возникали различные музыкальные строи, почему они были необходимы, и чего можно ожидать в будущем. В первой части этой книги говорится о физике звука, о строении слухового аппарата человека и о том, что существенно для восприятия звуковысотности, а что нет. Вторая часть посвящена традиционным представлениям о «гармоничности» звуковых сочетаний, истории различных «математических» строев. В третьей части мы показываем, как формируется равномерно темперированный 12-ступенный звукоряд, говорим о его возможностях и ограничениях. Наконец, четвертая часть представляет более глубокую теорию звуковысотности в музыке, использующую идеи теории информации, квантовой механики, психологической теории деятельности и общей теории иерархий.

# МИР ЗВУКОВ

Да, тем творение прекрасней,  
Чем нами взятый материал  
Нам неподвластней:  
Стих, звуки, мрамор иль металл.

*Т. Готье*

## 1. Звук в природе и в музыке

Певучесть есть в морских волнах,  
Гармония в стихийных спорах,  
И стройный мусикийский шорох  
Струится в зыбких камышах.

*Ф. И. Тютчев*

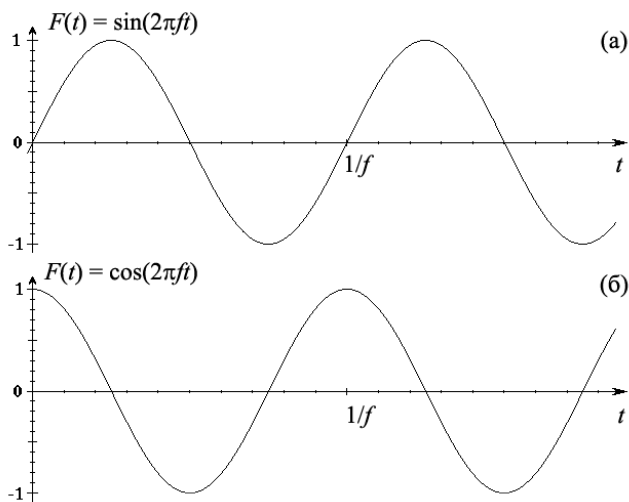
Человека со всех сторон окружают звуки. Да и все живые существа на Земле умеют реагировать на звуковые колебания, несущие важную информацию об окружающей среде: о грозящих опасностях, о близости добычи, о присутствии существ того же вида... Звук обладает набором физических характеристик, которые в разной степени используются живыми организмами: сила звука, его тембр, длительность, «объемность» звука, а также динамические характеристики, то есть изменение параметров звука во времени.

Что же такое звук? Если небольшой объем воздуха колеблется взад-вперед около некоторого среднего положения, он толкает соседние объемы, так что те тоже начинают колебаться — и в воздухе распространяется волна колебаний. Такие колебания называются продольными и могут передаваться любой достаточно плотной средой: воздухом, водой, камнем, деревом — или, например, плазмой. Бывают колебания другого рода — поперечные. Например, колебания натянутой струны, о которых мы еще будем говорить подробнее.

Поперечно колеблющаяся струна заставляет колебаться воздух вокруг себя — и вызывает в нем волну продольных колебаний.

Размах колебаний, максимальное отклонение от среднего положения, называется амплитудой. Для звуковых колебаний, квадрат амплитуды определяет силу звука, которая воспринимается как его *громкость*.

Основная характеристика всякого колебательного движения — *частота*, то есть число колебаний в единицу времени (например, за одну секунду). Чистое («гармоническое») колебание с постоянной частотой описывается математически функциями синуса и косинуса (рис. 1). Однако в природе не бывает колебаний с одной, абсолютно постоянной частотой. Всегда смешиваются колебания с разными частотами и разными амплитудами. Особая роль гармонических



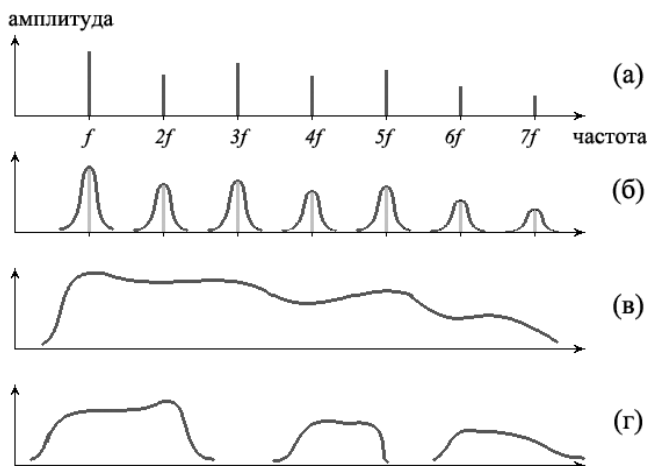
**Рис. 1 — Гармонические колебания.**

Верхняя кривая (а) — синусоида; нижняя кривая (б) — график функции  $\cos(2\pi ft)$ . Можно представить  $\sin(2\pi ft)$  как  $\cos[2\pi f(t-t_0)] = \cos(2\pi ft - \pi/2)$ , то есть синус отличается от косинуса только фазовым сдвигом  $\varphi_0 = \pi/2$ . От фазового сдвига зависит относительная величина отклонения от равновесия при  $t = 0$ .

колебаний при этом состоит в том, что по законам механики любое малое колебание произвольного упругого тела или среды оказывается



суммой независимых гармонических колебаний — нормальных мод. Набор амплитуд всех участвующих в сложном движении колебаний называется его спектром. Спектр звуковых колебаний воспринимается как окраска, «качество» звука — его *тембр*.



**Рис. 2 — Виды спектров.**

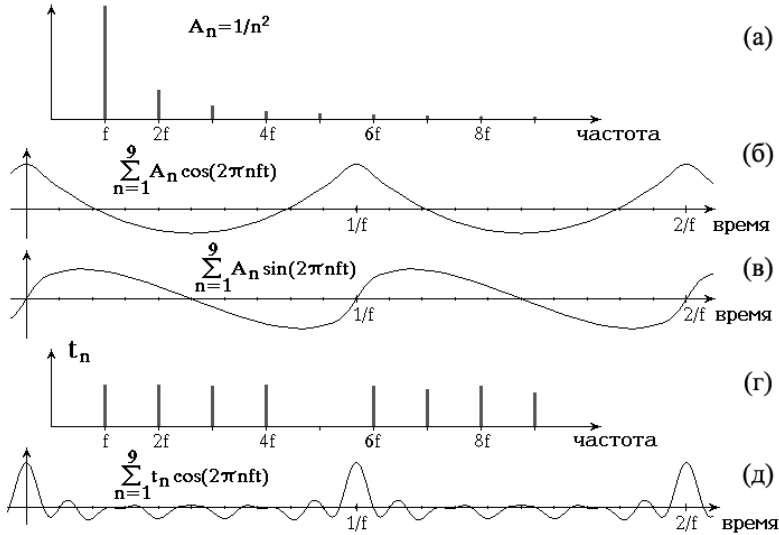
- (а) — линейчатый; (б) — квазилинейчатый (дискретный);  
 (в) — непрерывный (сплошной); (г) — формантный.

Еще одна характеристика всякого колебания — его фаза, момент прохождения через среднее положение. Соотношение фаз в сложном звуковом колебании определяет объемность звучания. Управление фазами широко используется в технике для создания впечатления пространственной разнесенности источников звука или движения.

Всякое искусство имеет свой материал. Материал музыки — звуки. Но далеко не всякий звук можно назвать музыкальным. В языке существует большое количество звукоподражательных слов, означающих наиболее типичные для природы, шумовые звучания: шорох, шум, стук, гул, бряцание, шипение, гром, грохот и т. д. В музыке же используются главным образом звуки, имеющие ясно выраженную высоту. Такие звуки, с точки зрения физики, выделяются в особый класс колебаний — периодических, то есть повторяющих форму колебания через определенный временной интервал — период коле-

бания. Период колебания равен обратной величине его частоты, с логарифмом которой и связана высота звука.

Если форма сигнала повторяется совершенно без изменений, то спектр колебания содержит только составляющие с частотами, пропорциональными основной частоте (рис. 2а). Говорят, что периодическое звуковое колебание имеет основной тон с частотой  $f$  — и обертоны с частотами  $2f, 3f, \dots$ . Вообще говоря, каждый обертон имеет



**Рис. 3 — Сложение колебаний.**

Для спектра, имеющего вид (а), показана форма колебаний при сложении отдельных гармонических составляющих с нулевыми (б) и ненулевыми фазами (в). Видно, что изменение фаз сильно влияет на форму колебания. Тем не менее, звуки, отвечающие колебаниям вида (б) и (в), будут восприниматься человеком как качественно одинаковые. Для другого спектра (г) частичные колебания просуммированы с нулевыми фазами (д). Сравнение кривых (б) и (д) показывает, что форма колебаний существенно зависит от набора гармонических компонент — спектра, причем это различие хорошо фиксируется человеком.

свою амплитуду и фазу, так что форма колебания может быть весьма сложной. На рис. 3 показано, как сложение одних и тех же гармонических колебаний (спектр на рис. 3а) с разными фазами дает

совершенно разные формы колебаний (рис. 3б,в). Изменение амплитуд отдельных компонент в спектре колебания (рис. 3г) также сильно влияет на его форму (рис. 3д).

В природе не бывает абсолютно периодических колебаний. Звук затухает со временем, в нем возможны разного рода переходные процессы. Есть специальные технические приемы, позволяющие музыканту исполнять звук с переменной частотой основного тона: вибрато, глиссандо и др. При этом остается ощущение высоты звука, то есть форма колебаний меняется от одного периода к другому не очень сильно. Это означает, что линии в спектре звука становятся слегка «размазанными» (рис. 2б), но в целом дискретный характер спектра сохраняется.

Если в спектре присутствуют колебания, не кратные основной частоте, человек воспринимает звук как комбинацию звуков с разными высотами (созвучие). Как мы увидим в дальнейшем, созвучия воспринимаются по-разному, в зависимости от взаимного расположения входящих в них звуков.

Когда спектр содержит большое количество колебаний с независимыми частотами, а размазка каждого из них достаточно велика, возникает так называемый «непрерывный», или «сплошной» спектр (рис. 2в). Как раз такие звуки и воспринимаются как шум. Таким образом, шум — это множество высоких и низких звуков, быстро сменяющихся один другим, неожиданно и резко возникающих и обрывающихся. Такие звуки могут использоваться в музыке для создания особого колорита, но мало пригодны для музыкального мышления. Однако извлечение шумовых звуков в определенном ритме сильно обогащает их выразительные возможности — и широко применяется в музыке (например, ударные инструменты).

Есть особая разновидность звуков, промежуточная между шумами и музыкальными звуками. Спектр их имеет вид нескольких непрерывных полос, отчетливо разделяющихся по высоте (рис. 2г). Эти полосы обычно называются *формантами*. Пример такого рода сигналов — гласные звуки в языке, звучание некоторых ударных инструментов (литавры, колокола), некоторые бытовые и производственные шумы. Воспринимаются эти звуки как не имеющие высоты, но имеющие некоторую высотную окраску. Со временем у человека выработались даже разные механизмы для восприятия звуков с линейчатым и формантным спектром — звуковысотный и тембровый слух. В

последние годы выяснилось, что тембровый слух играет важную роль в восприятии музыки. Об этом пойдет речь в последней главе.

## 2. Мир слуха

Кто уследит в окрестном звоне,  
Кто ощутит хоть краткий миг  
Мой бесконечный в тайном лоне,  
Мой гармонический язык?

*А. Блок*

Живые организмы имеют специальные органы для ощущения и генерации звука. У людей границы слышимости звуков по частоте зависят от слухового опыта, возраста, а также от психологической настройки на восприятие сигналов определенного вида (сенсорная установка). Наиболее важный для человека диапазон частот — от 100 до 2000 Герц (т. е. колебаний в секунду). В этом диапазоне лежат речевые сигналы, а также голоса большинства музыкальных инструментов. Частоты слышимых человеком звуков связаны с размерами человеческого тела. Так, среднее расстояние между ушами дает четверть длины волны для звуков, которые максимально пригодны для определения направления на источник звука (звуковой пеленгации). Оказывается, что эта длина волны соответствует частоте около 440 Гц (нота *ля* первой октавы). И первый крик новорожденного младенца близок по частоте к этому значению.

Считается, что человек воспринимает как звук колебания воздуха с частотами от 16 до 20000 Гц. В связи с возрастным увеличением жесткости органов среднего уха и нарушениями кровоснабжения слухового аппарата (склероз капилляров внутреннего уха), верхняя граница звуковысотной чувствительности в течение жизни человека понижается: в 35-летнем возрасте — до 15000 Гц, в возрасте 40 лет — до 13000 Гц, и далее примерно на 150 Гц в год. У мужчин потеря слуха идет более быстрыми темпами, чем у женщин. Однако физиологические изменения могут полностью компенсироваться увеличением слухового опыта, и человек часто лишь в преклонном возрасте начинает жаловаться на слух.

Колебания с частотой ниже 16 Гц называются инфразвуком, а колебания с частотой выше 20000 Гц — ультразвуком. Ультразвуковой диапазон используется для эхолокации морскими млекопитающими (например, дельфинами) и наземными животными (летучие мыши). Птицы весьма болезненно воспринимают ультразвук с частотами около 25000 Гц. С помощью ультразвуковых установок можно отпугивать птиц на полях, аэродромах и от питьевых водоемов. Повышенная чувствительность к ультразвуку наблюдается у многих слепых людей, которые используют ее для ориентации в окружающей обстановке. Заметим, что ощущение людьми ультразвуков, как и инфразвуков, возможно не только через звукопроводящие системы уха, но и по другим каналам (проприоцепция и интероцепция). Известно, что действие инфразвука с частотой 2–20 Гц сопровождается у людей ощущениями вращения, раскачивания, чувством дискомфорта — и иногда вызывает страх. Знаменитый физик Роберт Вуд сконструировал для театра инфразвуковую трубу (по аналогии с самыми низкими органными трубами), которая должна была усилить обстановку напряженности в одном из действий спектакля. Эффект превзошел все ожидания. При включении трубы в зале началась паника — и трюк пришлось отменить.

Однако мы живем в мире инфразвуков. Инфразвуковые колебания возникают при порывах ветра, при быстром движении человека, животных, транспорта и при работе промышленных объектов. Всем живущим поблизости от крупных заводов или бывавшим вблизи идущих речных или морских судов знаком характерный низкий шум, за которым следует полоса инфразвука с частотами 5–110 Гц. Действие его на человеческий организм исследовано не вполне, но может оказаться весьма вредным, из-за совпадения инфразвуковых частот с резонансными частотами биологических объектов.

Мощные инфразвуковые волны в диапазоне 0.1–0.5 Гц сопровождают извержения вулканов, землетрясения, цунами, приливы и отливы, штормы, ураганные ветры, смерчи, падения болидов, ядерные взрывы и т. д. Звук от взрыва вулкана Кракатау был слышен на расстоянии 1.5 тысяч километров. Инфразвук же характеризуется еще большей проникающей способностью и распространяется на расстояния до десятков тысяч километров, особенно в морской воде.

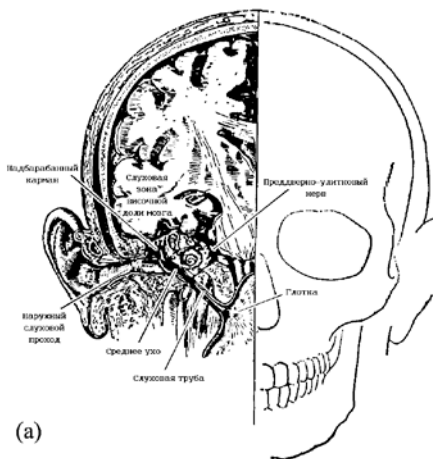
Многие животные издают и слышат звуки, выходящие за диапазон слышимости человека. Так, собака слышит звуки с частотой до

38000 Гц, кошка — до 40000 Гц, летучая мышь — от 30 до 70000 Гц. Дельфины издают очень высокие ультразвуки (до 200000 Гц). Слух китообразных чувствительнее человеческого и в обычном для человека диапазоне. Так, абсолютный порог слышимости у дельфинов в 400, а у касаток в 1000 раз меньше, чем у человека. Очень мощные инфразвуки издают киты-горбачи, весящие десятки тонн. «Пение» горбачей весьма разнообразно и, при ускоренном воспроизведении, напоминает пение птиц. По разнообразию издаваемых звуков, горбачи так же выделяются среди китообразных, как соловьи в мире пернатых.

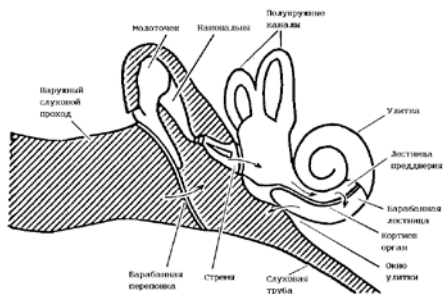
Минимальная громкость звука, при которой он становится слышен, называется абсолютным порогом слышимости. Порог этот зависит от условий слушания, от возраста и от частоты звука. Наиболее чувствительно человеческое ухо к звукам с частотой 1000–6000 Гц, где минимальная энергия слышимой звуковой волны сравнима с энергией теплового движения молекул. Органы слуха многих животных и насекомых (например кузнечика или летучей мыши) фиксируют толчок вызываемый одной молекулой. Чувствительность человеческого уха резко снижена на частотах 100–500 Гц, характерных для речевых сигналов. Это, по-видимому, направлено на то, чтобы в этом диапазоне на полезные сигналы меньше накладывался неизбежно существующий фон и не появлялось избыточной информации. Максимум абсолютной чувствительности у человека около 2300 Гц.

Способность человека различать близкие по частоте звуки характеризуется так называемым дифференциальным порогом. Дифференциальная чувствительность зависит от частоты и силы звука. Минимальная ощущаемая разность частот, наблюдавшаяся в психофизических экспериментах, — порядка 1 Герца, в диапазоне 200–400 Гц.

Ощущение звука доступно всем живым существам. Даже амёбы реагируют на вибрации в среде. У высших млекопитающих и у человека органы слуха весьма сложны. Физиологические процессы, связанные с ощущением звука, до сих пор слабо изучены, несмотря на то, что научные работы на эту тему насчитываются тысячами. На протяжении долгого времени господствовали сильно упрощенные представления о звуковысотном слухе — и лишь в последние годы внимание исследователей стало обращаться к тонким эффектам в слуховом аппарате и к процессам в высших отделах мозга, влияющим на ощущение и восприятие звука.



(а)



(б)

**Рис. 4 — Строение органов слуха человека** (по книге [6])

Звуковые колебания улавливаются ушной раковиной сложной формы, помогающей концентрации сигналов. Многие животные умеют ее поворачивать для определения направления на звук. У человека звуковая пеленгация осуществляется, в основном, за счет бинауральности (то есть сравнения сигналов от двух ушей), а также специальной формы ушной раковины (для определения положения источника звука по вертикали). Через ушную раковину звук передается в среднее ухо (рис. 4а), где вызывает колебания очень тонкой (тоньше волоса) барабанной перепонки. При помощи трех маленьких косточек колебания передаются во внутреннее ухо, где их принимает особый резонатор в форме улитки — кортиев орган, заполненный специальной жидкостью-электролитом (рис. 4б). В улитке возникают весьма сложные волновые процессы, включающие как механические колебания, так и волны поляризации в электролите. Огромное количество (около 25 тысяч) нервных волокон переводят эти колебания на электрохимический язык нервных клеток — нейронов. Здесь начинается сложный путь от ощущения звука к его восприятию.

Органы слуха не просто передают сигнал из внешнего мира в мозг, перекодируя его из одной формы в другую. Важным качеством человеческого ощущения и восприятия является нелинейность — то есть активное преобразование входного сигнала на всем пути к мозгу и в самом мозгу. Для звука со сложным спектром нелинейность проявляется как появление суммарных и разностных тонов: если в спектре

присутствуют частоты  $f_1$  и  $f_2$ , то слуховой анализатор строит также колебания с частотами  $f_1 + f_2$  и  $f_1 - f_2$ . Впервые разностный тон был замечен в XVII веке падуанским музыкантом Джузеппе Тартини, при одновременном ведении смычком по двум струнам скрипки. На год раньше Тартини существование разностных тонов предполагал французский музыкант и ученый Ж.-Ф. Рамо. Об этом же явлении — ощущении низких призвуков при одновременном звучании двух звуков — говорил и гамбургский органист Г. А. Зорге. Значительно позднее, в середине XIX века, известный немецкий ученый Г. Гельмгольц — врач, физиолог, физик, философ — исследовал это явление и обнаружил также суммарные тона, которые обычно маскируются обертонами музыкальных звуков. Таким образом, при одновременном звучании двух музыкальных звуков мы слышим:

1. основные тона;
2. обертоны;
3. разностные и суммарные тона от основных тонов;
4. разностные и суммарные тона от обертонов;
5. суммы и разности разностных и суммарных тонов.

Когда же звучит целый оркестр, в человеческом ощущении возникает сложнейшая звуковая ткань. И требуется огромная внутренняя работа, чтобы воспринять эту лавину информации, уловить в хаосе звуковых сигналов то, что называется музыкой.

Нелинейность слухового аппарата человека проявляется и при восприятии звука со сплошным или формантным спектром. Так, например, за счет формирования комбинационных тонов мы можем восстанавливать тембр голоса, передаваемого по телефону с большими частотными искажениями, — и в результате не только воспринимаем смысл сообщения, но и узнаем говорящего. Однако для музыки гораздо важнее способность человеческого слуха выделять простые тона из звукового сигнала любой сложности. Непрерывный спектр звука как бы разделяется на некоторый общий фон — и набор отдельных тонов (или формант). Механизм такого разделения еще почти не изучен. Это многоуровневый процесс, с возможностью перестройки, в зависимости от слуховых задач, на разные алгоритмы распознавания тона и шумов. В современной музыке, где весьма широко применяются разного рода тембровые эффекты, возникло своеобразное направление — создание музыкальных композиций путем прямой записи на магнитную ленту (или диск) сложных комбинаций шумов, с широким применением



компьютерной техники. Тем не менее, музыкальное восприятие все равно выделяет в этом потоке звука именно музыкальные интонации, то есть переходы между звуками определенной высоты. И именно этими интонациями и определяется музыкальное содержание произведения, а шумовые эффекты воспринимаются как оформление.

### 3. Музыкальный слух

И сады, и пруды, и ограды,  
И кипящее белыми волпами  
Мирозданье — лишь страсти разряды,  
Человеческим сердцем накопленной.

*Б. Пастернак*

Человек имеет уникальный инструмент для создания звуков — голос. Человеческий голосовой аппарат способен издавать и шумы, и фонемы, и музыкальные звуки. Однако приобрел он эту способность не сразу, а в процессе долгого исторического развития. Развитие голоса шло вместе с развитием музыкального слуха — и с развитием всего образа жизни человека в мире. В результате человек смог преодолеть многие физиологические ограничения, накладываемые слуховым аппаратом. Например, несмотря на физиологическое снижение абсолютной чувствительности слуха с возрастом, многие выдающиеся музыканты продолжали активно работать до самых преклонных лет: Г. Ф. Телеман (1681–1767), И. Стравинский (1882–1971), О. Мессиаан (1908–1992) и другие — они не только писали музыку, но и управляли оркестровым исполнением, что требует весьма тонкого слуха. Глухота не помешала Бетховену создать выдающиеся по выразительной силе произведения.

Крайне высока чувствительность человека к изменению интонации. Хотя физиологический дифференциальный порог всегда больше 1 Герца, можно уловить на слух изменения интонации, вызванные сдвигом одного из звуков на десятые и даже сотые доли Герца! Важно, что музыкальные звуки и интервалы между ними воспринимаются не сами по себе, а в составе сложного целого, так что и восприятие звука становится сложной деятельностью и предполагает самостоятельную активность слушателя.

До недавнего времени бытовало убеждение, что человек слышит лишь небольшое число обертонов (максимум 6–10), особенно для высоких звуков. Однако сейчас имеются данные о наличии у человека специального механизма для восприятия тонких деталей формы звукового колебания, которые определяются высшими обертонами, выходящими за верхнюю границу слышимости (20000 Гц). Постоянное взаимодействие слухового аппарата с высшими отделами мозга позволяет выделить в звуке структуры любой сложности. Такое взаимодействие развивается в процессе освоения человеком все новых форм деятельности — и новых приемов мышления.

Таким образом, музыкальный слух слабо связан с физиологическими параметрами слухового аппарата и определяется воспитанием и обучением, музыкальным опытом человека. Существует несколько уровней музыкального слуха, по-разному участвующих в восприятии музыки. Просто звуковысотный слух, способность выделять звуки различной высоты, — врожденное качество любого человека. По мере знакомства со все более разнообразной звуковой средой звуковысотный слух развивается, обогащается и уточняется. Способность точно определять высоту отдельной ноты называется абсолютным слухом. Например, про Моцарта рассказывают, будто он смог услышать, играя на чужой скрипке, что она настроена на четверть тона выше его собственной. Однако далеко не всегда из людей с абсолютным слухом получаются хорошие музыканты, а большинство выдающихся представителей музыкального искусства не обладало абсолютным слухом, и даже те музыканты, которые в детстве обладали этой способностью, впоследствии практически никак не использовали ее в своем творчестве.

Гораздо более важен для музыки интервальный слух, то есть способность различать музыкальные интервалы (расстояния между нотами по высоте). Без этой способности невозможно ни создание, ни исполнение, ни восприятие музыки. Интервальный слух развивается музыкальным воспитанием, а специальные методики позволяют выработать его даже у тех, кому «медведь на ухо наступил». Именно всеобщей доступностью интервального слуха объясняется то, что музыка так или иначе воспринимается почти всеми людьми, а не только музыкальной элитой.

Более тонким является восприятие на уровне интонационного слуха. Один и тот же музыкальный интервал можно исполнять немного по-

разному, в зависимости от художественных задач. Именно различиями в интонировании определяется все разнообразие индивидуальных музыкальных стилей. Даже не очень тренированный человек в состоянии понять, когда «душевно играют», а когда лишь извлекают нужные ноты в нужном ритме. С развитием музыкальной культуры появляется возможность различать на слух «по почерку» разных исполнителей высокого класса.

Эмоциональное воздействие музыки на слушателя известно всем. Однако и здесь требуется своего рода «эмоциональный слух». Нельзя испытать какую-либо эмоцию, если просто не способен ее испытывать. Тем более требует особой способности ассоциирование эмоций с музыкальными интонациями. У каждого человека свой эмоциональный слух, выработанный в соответствии с его индивидуальным жизненным опытом. Однако имеются и некоторые общезначимые связи, характерные для музыкальной культуры каждого народа и каждого времени.

Немаловажно для восприятия музыки и общее эстетическое развитие человека. Музыка часто пишется в расчете на внемузыкальные ассоциации, на память о впечатлениях, полученных от литературных произведений, от картин, скульптур, архитектуры или пейзажа. Есть много «программных» композиций на мифологические сюжеты, на исторические, религиозные или даже политические темы. Чтобы воспринимать такого рода музыку, нужно не только знать, о чем идет речь, но и уметь видеть универсальное эстетическое содержание в каждом отдельном виде искусства и вообще в жизни.

Развитие музыки привело к выработке многообразных принципов ее организации, форм и жанров, технических приемов и исполнительских условностей. Все эти элементы музыкального языка требуют специального изучения, чтобы можно было не просто прослушать и прочувствовать музыкальное произведение, но и понять его замысел, его внутреннюю логику, уловить его смысл. Здесь мы поднимаемся уже в сферу музыкального мышления, искусство становится инструментом постижения мира. Многие выдающиеся ученые признавали сильное влияние искусства на их научное творчество. Например, великий физик Альберт Эйнштейн любил игру на скрипке и считал, что музыка дает ему новые идеи. Не случайно А. Конан-Дойль изобразил своего Шерлока Холмса музицирующим на скрипке — и хорошее чувство музыкальной интонации помогло ему в рас-

следовании одного из дел. «Музыка есть бессознательное упражнение души в арифметике», — говорил один из создателей высшей математики Лейбниц. Действительно, музыка имеет много общего с логикой — и если логика описывает движение мысли в понятиях, то музыка *изображает* движение мысли, делает его наглядным и легко уловимым.

Разумеется, невозможно в одной небольшой книжке рассказать о всех элементах музыкального мышления. Мы выделяем здесь лишь одну сторону музыкального целого, лишь одно измерение в пространстве музыкальных образов — звуковысотность. Это наиболее развитая область музыкальной науки, которая даже оформилась в специальную научную дисциплину — музыкальную акустику. Однако до сих пор в ней существует много неясностей, предрассудков и заблуждений, противоположных мнений и различных позиций. Мы, конечно, излагаем лишь свою точку зрения на природу и функции звуковысотности в музыке — и говорим вместе с выдающимся французским философом-просветителем Гельвецием: «У предметов столько различных сторон, что следовало бы всегда исследовать и никогда не спорить».

# ОЩУЩЕНИЕ ЗВУКА: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СТРОИ

Игру тонов и форм открыл впервые он  
И, восприняв их ритм, застыл от возбужденья.

*П. К. Харт*

## 1. Истоки музыки

Откуда он, сей гул непостижимый?..  
Иль смертных дум, освобожденных сном,  
Мир бестелесный, слышный, но не зримый,  
Теперь роится в сумраке ночном?

*Ф. И. Тютчев*

За свою многовековую историю человечество создало много звуковых систем, по-разному использующих высоту звука в музыке. Все они так или иначе сохраняют свое значение и в современной музыкальной культуре. Общее между ними одно: дискретный набор элементов, из которых строится музыкальное произведение. На музыку могут накладываться разного рода шумы, однако в основе ее четкий рисунок, создаваемый особыми средствами в каждой отдельной культуре.

Как же возникли музыкальные звуки? Некоторые исследователи ранних форм музыкального творчества полагали, что первичный, «стихийный» звуковысотный анализ был связан с развитием устойчивых речевых интонаций. Самыми примитивными проявлениями музыкального творчества они считали крики и возгласы, вызываемые разного рода эмоциями, сильными впечатлениями. Различная высота звука соответствовала разной степени возбуждения и его характеру. Выбирая из всей массы частот такие звуки, произвольно комбинируя эмоции, человек начал ощущать потребность в расчленении, осознании и упорядочении звуков. Подобной гипотезы

придерживался французский писатель и философ XVIII века Жан-Жак Руссо.

Однако современные данные противоречат идее о речевом происхождении музыкальных интонаций. Речь и музыка — это принципиально разные деятельности. Изобразительная сторона в музыке начала развиваться уже на сложившейся звуковой основе. Выдающийся украинский ученый, специалист в области музыкальной этнографии К. Квитка показал, что первые музыкальные инструменты создавались, ориентируясь преимущественно на орнамент, на пространственные формы — и издавали звуки произвольной высоты. Первобытная музыка основывалась на простом различении звуков разной высоты в бытовых шумах, голосах животных и птиц. Голос человека был еще недостаточно развит, чтобы удерживать определенную высоту звука — и первые «вокальные» мелодии имели неустойчивые, «плавающие» интонации, несколько напоминающие речевые. Однако язык в то время не обладал достаточным богатством интонаций, даже звуки его еще недостаточно четко различались. Возможно, именно под влиянием музыкальных интонаций формировались первобытные *тонические* языки, где повышение или понижение тона было важно для понимания смысла слова или предложения.

Следы первобытного музыкального интонирования сохранились и по сей день в традиционных мелодиях некоторых народов, в церковных речитативах (так называемая псалмодия), в колыбельных песнях и т. п. Однако с развитием человека появлялись и новые музыкальные находки. Быстрое развитие речи, в связи с ее активным участием в производственной деятельности, привело к вытеснению музыки в сферу культовых ритуалов, к которым поначалу примыкали любые праздники и развлечения. Слово подчинило себе музыку — и теперь уже язык диктовал ей свои требования. Так, в античной музыкальной культуре считалось, что музыка неотделима от стиха, и ритм ее вообще не фиксировался в принятой тогда нотации. Это привело к трудностям в расшифровке дошедших до нас фрагментов античной музыки. Известный древнегреческий философ Платон писал: «Применение отдельно взятой игры на флейте и на кифаре включает в себе нечто в высшей степени безвкусное и достойное лишь фокусника». Однако уже в те времена многие исполнители отходили от общепринятых канонов и украшали свои мелодии развитыми голосовыми или инстру-

ментальными фиоритурами, используя иногда весьма необычные интервалы. И все же музыка оставалась тесно связана с другими искусствами Древней Греции: с поэзией, драмой и даже живописью. Лишь со временем разные искусства обрели самостоятельность.

Первые попытки теоретического осмысления музыки отражали эту особенность. Как правило, в работах древних философов она тесно связывалась с политикой, с религией и т. п. Однако в VI веке до нашей эры философ Пифагор с острова Самос установил ряд простых акустических закономерностей, сконструировав для этого специальный инструмент — канон, представлявший собой натянутую струну с переменной длиной. Философское учение Пифагора включало элементы обожествления чисел, геометрических фигур, абстрактных идей. Естественно, что ученики созданной им секретной школы (сам он почти не высказывался публично) стали утверждать, что музыка представляет собой лишь выражение математических закономерностей. В IV веке до нашей эры пифагорейцам («каноникам») противостояла противоположная эстетическая школа Аристоксена, которая подчеркивала творческий характер музыки, необходимость соразмерности всех ее элементов (отсюда название сторонников Аристоксена — «гармоники»). Ко II веку до нашей эры пифагорейцы превратились в странствующих чудаков-философов, которых никто уже не принимал всерьез. Тем не менее, мысль о связи музыки и математики продолжала жить. Многие идеи пифагорейцев были впитаны ранним христианством — и неудивительно, что вторая ступень средневекового университетского образования, квадривиум (то есть «четыре пути»), включала теологию, астрономию, математику и музыку. Многие композиторы средневековья находились под влиянием пифагоровой игры в числа, а пифагоров строй оставался теоретической базой конструирования музыкальных инструментов. И в XX веке знаменитый русский композитор Игорь Стравинский писал: «Музыкальные формы намного ближе к математике, чем к литературе, — возможно даже, что не к самой математике, а, вероятно, к математическому образу мышления и к математическим соотношениям». В 60-е годы сотрудник Лаборатории музыкальной акустики Московской государственной консерватории Н. Переверзев пишет книгу, в которой пытается доказать, что правильное интонирование возможно лишь в пифагоровом строе.

Но что представляет собой пифагоров строй — один из первых «математических» звукорядов, формально полученных на основании абсолютизации некоторых абстрактных интервалов? Обратимся сначала к так называемому натуральному звукоряду и к опытам со струной.

## 2. Колебания струны и натуральный звукоряд

На нить нанизанные звуки  
Плывут и реют в вышине...

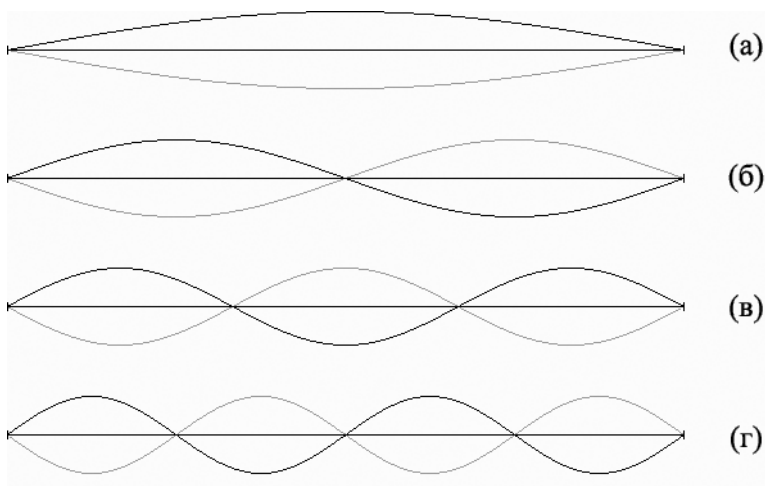
*Ян Райнис*

Звучащая струна — очень сложный физический объект. Еще в IV веке до н. э. пифагореец Архит предположил, что звук представляет собой колебания воздуха, а в III веке до н. э. эта идея была развита Евклидом. Однако изучение движения струны в полной мере было недоступно античным мыслителям. В XVII–XIX веках теорией колебательных и волновых явлений занимались Г. Галилей, Л. Эйлер, Д. Бернулли, М. Мерсенн, Т. Юнг, Д. Рэлей, Г. Гельмгольц. Была создана наука о звуковых процессах — акустика, заложены основы физиологии слуха. В описание картины движения звучащей струны особенно много внес Томас Юнг, который был не только блестящим ученым, но и разносторонним музыкантом.

Как уже говорилось, в музыке используются приблизительно периодические звуки, представляющие собой наложение синусоидальных колебаний с частотами, соотносящимися как числа натурального ряда: 1, 2, 3, ... Простейшим источником таких звуков является натянутая струна. Отклонение ее от положения равновесия в каком-либо месте приводит (после быстрых переходных процессов, придающих звуку характерную «щипковую» окраску) к возникновению постепенно затухающей *стоячей волны*. Самое сильное колебание (и самое медленное) — это колебание струны как целого, с максимальным отклонением в центре (рис. 5а). Такое колебание дает основной тон звука, по которому и определяется его высота. Но струна может колебаться и по-другому. Например, две ее половины становятся как будто независимыми струнами вдвое меньшей длины — и издадут тон вдвое большей частоты (рис. 5б). Точно так же, возможны



колебания с делением струны на три и более частей — они дают, соответственно, обертоны с утроенной, учетверенной и т. д. основной частотой (рис. 5в,г). Неподвижные точки называются узлами стоячей волны (в них струна как будто привязана), а точки, в которых амплитуда колебаний максимальна, называются пучностями.



**Рис. 5 Моды колебаний струны.**

Показаны первые четыре колебательных моды струны, соответствующие основному тону (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) гармоникам. Реальное колебание струны складывается из этих частичных колебаний, причем амплитуды высших гармоник обычно убывают обратно пропорционально квадратам их номеров, как на рис. 3а. Если аккуратно придерживать струну в средней точке, то колебания с узлом посередине сохраняются (2-я, 4-я и т. д. моды) — а колебания, имеющие здесь пучности, (1-я, 3-я и другие нечетные гармоники) будут подавлены. Получаемый при этом частичный спектр дает тембр октавного флажолета (на октаву выше основного тона струны).

Соотношение амплитуд всех этих частичных колебаний (колебательных мод) определяет соотношение амплитуд отдельных гармоник в спектре звука, его акустический спектр. Амплитуда колебаний целой струны как правило (если не использовать особых приемов звукоизвлечения) значительно больше, чем амплитуды колебания ее частей — и звучность обертонов убывает (для струны без

резонатора) как обратный квадрат частоты обертона. Можно выделить отдельные гармоники-призвуки, слегка прикасаясь к звучащей струне в соответствующих точках (узлах), чтобы погасить все «лишние» колебания. При игре на струнных инструментах, извлекаемый таким способом звук называется флажолетом. Так, например, если зафиксировать среднюю точку струны, возникает так называемый октавный флажолет: из всех гармоник остаются только четные, а высота основного тона получившегося звука определяется второй гармоникой спектра целой струны. Точно так же выделяют третью, четвертую и более высокие гармоники, оставляя неподвижной точку струны, которая делит ее в отношении 2 : 1, 3 : 1 и т. д. Из полного спектра при этом «вырезается» лишь часть гармоник, что придает флажолетам характерное «воздушное» звучание.

Частота издаваемого струной звука обратно пропорциональна ее длине. Если прижать струну в какой-либо точке, укоротив ее длину в  $\alpha$  раз, то оставшаяся часть струны издает звук с основной частотой в  $\alpha$  раз больше, чем у целой струны. Этим свойством и пользуются музыканты для извлечения звуков разной высоты на одной струне. Как правило, музыкальные инструменты имеют несколько струн, отличающихся длиной, толщиной, силой натяжения, или жесткостью материала — для того, чтобы высоты звуков, издаваемых открытыми струнами были различны.

Колебания реальной струны очень быстро затухают со временем. Особенно это касается обертоновых колебаний. Но если струна прикреплена к резонирующему телу — например, к деревянному ящику — тогда, за счет возникновения стоячих волн в сравнительно большом объеме, в движение приводятся большие массы воздуха и звук становится более долгим. Разные резонаторы по-разному меняют звучание струны, подчеркивая те обертоны, которые по частоте близки к собственным частотам резонатора. Особенности звучания инструментов разных видов, тембровая окраска, позволяют безошибочно различать их на слух даже непрофессионалу. Так, гитара или бандура подчеркивают низкие частоты, а балалайка или домра — высокие. Богато обертонами звучание смычковых инструментов (скрипка, виолончель и др.). Непосредственное управление воздушными потоками в резонирующих полостях характерно для духовых инструментов, что делает их тембры весьма разнообразными. Самый богатый из духовых инструментов, орган, содержит до нескольких тысяч специ-

ально подобранных резонаторов. В современной музыке прибегают также к активному формированию тембра с применением разного рода электронных устройств.

Человек издает звуки, используя большое количество резонаторов разного объема: грудная клетка и брюшная полость, полость черепа, гортань, полость рта, носовые пазухи и др. В результате, человеческий голос не просто богат обертонами — он еще и способен к изменению своей окраски в весьма широком диапазоне, что, конечно, используется в художественных целях. Есть также индивидуальные особенности голосовых тембров, позволяющие узнавать людей по голосам.

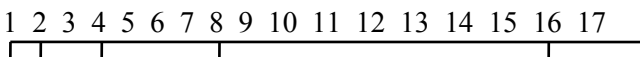
Несмотря на все разнообразие тембров звучания, оказывается, что воспринимаемые высоты звуков и интервалы между музыкальными звуками не зависят от того, на каком инструменте они извлекаются. Точно так же, не влияет на оценку высоты звуков пространственное распределение их источников — то есть фазы, составляющих звук колебаний. Это наводит на мысль, что высота звука определяется прежде всего частотой основного тона и, соответственно, частотами обертонов, — но не их амплитудами или фазами. Выдающийся советский ученый Н. А. Гарбузов показал, что даже если специально подавить основной тон, он легко восстанавливается восприятием человека по набору обертонов. Далее мы увидим, как человеческий мозг строит собственные, внутренние тембры, не зависящие от реальных акустических тембров — и именно в этом процессе тот или иной звук соотносится с каким-либо звукорядом.

Последовательность обертонов в музыкальном звуке называют натуральным, или природным звукорядом. Весь этот хор частот возбуждается при колебании одной струны. Таким образом, частоты ступеней натурального звукоряда относятся друг к другу как целые числа: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, ...

Возвращаясь к опытам со струной, можно заметить, что половина струны звучит очень слитно со звуком от целой струны. Музыкальный интервал между звуками с отношением частот 2 : 1 называется *октавой*. Ясно, что

$$2 : 1 = 4 : 2 = 8 : 4 = 16 : 8 = \dots$$

Иными словами, весь интервал частот натурального звукоряда делится на отрезки между обертонами, отстоящими на октаву друг от друга:



Мы видим, что в разные «октавы» попадает разное количество ступеней натурального звукоряда. Так, в первой октаве (от основного тона) их нет совсем; во второй — одна, разбивающая октаву на две части; в третьей — три ступени, с разбиением октавы на четыре части и т. д. Несмотря на то, что очень высокие гармоники музыкальных звуков практически неслышимы, человеческая психика, как мы увидим в дальнейшем, может порождать внутренние тембры с довольно большим числом обертонов, вплоть до нескольких десятков. Есть люди, которые могут даже ощущать на слух очень высокие обертоны — однако способность эта слабо связана с собственно музыкальным слухом.

Важной характеристикой любого звукоряда является набор музыкальных интервалов между его ступенями. Точно так же, как и для интервала октавы, можно задавать интервалы между любыми музыкальными звуками отношением частот их основных тонов. Например, интервал между второй и третьей ступенями натурального звукоряда задается отношением  $3 : 2$  и называется натуральной *квинтой*. Между третьей и четвертой ступенями натурального звукоряда возникает интервал натуральной *кварты*, отношение  $4 : 3$ . Отношения  $5 : 4$  и  $6 : 5$  задают соответственно натуральные *большую* и *малую терции*, а интервал  $5 : 3$  называется *малой секстой*. Из других интервалов упомянем *большую* и *малую секунды* ( $9 : 8$  и  $16 : 15$ ), а также *натуральную септиму* ( $7 : 4$ ).

Названия интервалов связаны с общеизвестным *диатоническим звукорядом*: *до, ре, ми, фа, соль, ля, си, до*<sup>1</sup>. Ступени его просто перечисляются на латинском языке: прима («первая»), секунда («вторая»), терция («третья»), кварта, квинта, секста, септима, октава. Чтобы охватить весь диапазон используемых в музыке звуков (примерно 7.5 октав), употребляются названия: «субконтроктава», «контроктава», «большая октава», «малая октава», «первая октава», «вторая октава» и т. д. Повышение ступени (обозначаемое знаком # — диез) или понижение ступени (обозначаемое знаком ♭ — бемоль) называется *альтерацией* (буквально: «изменение») и приводит к изменению интервалов диатонического звукоряда. Для обозначения таких «измененных» интервалов применяются термины «большая», «малая», «увеличенная», «уменьшенная» и т. п.

В связи с высокой слитностью звучания октавы, звуки с отношением частот  $2 : 1$  в музыке обычно просто отождествляются — и это

подчеркивается одинаковыми названиями. Так, нота *до* появляется и в первой, и во второй, и в третьей октаве. Можно «перенести» поэтому все ступени натурального звукоряда в одну октаву (например, между основным тоном и низшим обертоном). Перенос этот осуществляется «вычитанием» нужного количества октав. Поскольку для определения интервала используются отношения частот, такому «вычитанию» отвечает деление на соответствующую степень двойки: перенос на октаву вниз — деление на 2, на две октавы — деление на 4 и т. д. В результате частота 3 переходит в частоту  $3 : 2$ , частоты 5, 6, 7 — в частоты  $5 : 4$ ,  $6 : 4 = 3 : 2$ ,  $7 : 4$  — и т. д. Точно так же можно переносить звуки и на октаву вверх (умножение на два), заполняя тем самым ступенями натурального звукоряда все октавы. Получаемые ступени звукоряда приведены в таблице:

1	9 : 8	5 : 4	11 : 8	3 : 2	13 : 8	7 : 4	15 : 8	первая октава
2	9 : 4	5 : 2	11 : 4	3	13 : 4	7 : 2	15 : 4	вторая октава
4	9 : 2	5	11 : 2	6	13 : 2	7	15 : 2	третья октава
8	9	10	11	12	13	14	15	четвертая октава

Здесь выписаны все ступени, получающиеся из обертонов вплоть до 15-го. Однако обертонов может быть очень много, и неясно, какие из получаемых звуков могут образовывать действительно используемые в музыке звукоряды. С другой стороны, натуральный звукоряд, перенесенный в одну октаву, не содержит многих важных ступеней (например, квинты — отношение  $4 : 3$ ). Одна из первых попыток решения этой проблемы была предпринята в VI веке до нашей эры Пифагором.

### 3. Звукоряд Древней Греции

Спешим назад, к чертам почти забытым,  
Единой мерой и числом отлитым.

*У. Б. Йеймс*

Понятие натурального звукоряда возникло далеко не сразу. В первобытной музыке выделялся только один звук с определенной высотой — как уже отмечалось, частота, примерно соответствующая

ноте *ля* первой октавы, играла биологически важную сигнальную функцию. Этот звук «опевался» сверху и снизу нотами неопределенной высоты — и в древнегреческой музыкальной терминологии он получил название «меса» (то есть «середина»). Интервалы «опевающих» звуков по отношению к центральному могли быть как очень маленькими, так и довольно большими. Постепенно сформировалось ощущение большей устойчивости звуков, отстоящих примерно на кварту вниз и вверх от центрального тона — по сравнению с другими «опеваниями». Разумеется, музыкальный слух был еще не настолько развит, чтобы точно определить положение устоев. Положения их варьировались от *ре* до *ми* (то есть от кварты до квинты по отношению к *ля*). Таким образом, вместе с месой *ля* эти два звука образовали простейший звукоряд, называемый дуотоникой (то есть октава между верхним и нижним устоями делится на *две* части месой *ля*). Разумеется, в то время октава еще не играла никакой роли в музыке, и дуотоника воспринималась не как деление октавы от  $mi^1$  до  $mi^2$  квартой  $ля^1$ , а просто как набор трех звуков относительно фиксированной высоты — при сохранении опевающих центральный звук «плавающих» звучаний. Однако подсознательно отождествление отстоящих на октаву звуков уже произошло — и настройка первых струнных инструментов как правило производилась на октаву ниже, по *ля* малой октавы (так, современная гитара звучит на октаву ниже нотной записи).

Архаическая лира имела пять струн: в центре находилась меса (*ля*); нижняя струна (около  $mi^1$ ) называлась «нэта» («низкая») — и соответствующая ступень звукоряда стала называться «нэта»; верхняя струна (около  $mi^2$ ) называлась гипатой; две добавочные струны предназначались для «опевающих» нот и настраивались каждым исполнителем по-своему, в зависимости от индивидуальных навыков и племенных обычаев. Они назывались «парамеса» («рядом с месой») и «лиханос» — эти названия также стали впоследствии названиями нот древнегреческого звукоряда. Но необходимость определенной настройки парамесы и лиханоса требовала более четкой фиксации интервалов, меньших кварты. Развивающийся музыкальный слух научился различать два разных устоя на месте прежних, дуотонических: ноты *ре* и *ми* стали различными, так же как и интервалы кварты и квинты. Нижняя струна (нэта) теперь настраивалась на ноту  $mi^1$  для ноты  $ре^1$  потребовалось ввести еще одну струну, которая так и называлась: паранэта (то есть «рядом с нэтой»). Так, к VII веку до н. э.,

установился новый звукоряд — пентатоника («пять звуков»). Семи-струнная кифара поэта и певца Терпандра, прославленного своей победой на состязании певцов в Спарте, была настроена именно в этом строе.

Пентатоника по-прежнему воспринималась древними греками не как октавный звукоряд, а как объединение двух «трихордов» (буквально: «три струны»): *ми<sup>1</sup>–ре<sup>1</sup>–си*, *ля–соль–ми*. Оба трихорда имеют одинаковую интервальную структуру: крайние звуки отстоят на кварту друг от друга, а средний делит кварту на две части. При фиксированности крайних звуков трихорда, средний звук мог сильно варьироваться в реальном исполнении. Постепенно расширялся диапазон используемых в музыке звуков — и кифара стала 11-струнной, с пентатонической настройкой.

В VI веке до н. э. произошло дальнейшее усложнение звукоряда. Внутри трихорда выделяется уже не одна, а две ступени. Получающиеся последовательности из четырех звуков называются тетрахордами: *ми<sup>1</sup>–ре<sup>1</sup>–до–си*, *ля–соль–фа–ми*. К началу V века до н. э. сложилась так называемая «полная неизменная система», включающая все звуки древнегреческой музыки.

#### Полная неизменная система

<i>ля<sup>1</sup></i>	нэта	}	тетрахорд верхних				
<i>соль<sup>1</sup></i>	паранэта						
<i>фа<sup>1</sup></i>	трита						
<i>ми<sup>1</sup></i>	нэта	}	тетрахорд разделенных	<i>ре<sup>1</sup></i>	нэта	}	
<i>ре<sup>1</sup></i>	паранэта			<i>до<sup>1</sup></i>	паранэта		тетрахорд соединенных
<i>до<sup>1</sup></i>	трита			<i>си</i>	трита		
<i>си</i>	парамеса			<i>ля</i>	меса		
<i>ля</i>	меса	}	тетрахорд средних				
<i>соль</i>	лиханос						
<i>фа</i>	парипата						
<i>ми</i>	гипата	}	тетрахорд нижних				
<i>ре</i>	лиханос						
<i>до</i>	парипата						
<i>Си</i>	гипата						
<i>Ля</i>	просламбономенос						

Видно, что звуки тетра хорда имеют уже не просто определенную высоту — каждый из них имеет свою функцию, в зависимости от места в тетра хорде. Отсюда и одинаковость названий звуков в разных тетра хордах. Иными словами, в музыкальном мышлении древних греков тетра хорд играл такую же роль, как октава в современной музыке. Однако, с точки зрения современной теории звукорядности, ясно, что образование «полной неизменной системы» свидетельствует о формировании нового, семиступенного звукоряда — диатоники. Поскольку целостной единицей музыкального мышления был тетра хорд, диатонический звукоряд мог быть представлен только как соединение тетра хордов, охватывающее семь звуков в октаве. В V веке до н. э. таким способом сложилось большое количество семиступенных диатонических ладов. Например, соединение «дорийского» тетра хорда  $mi^1-re^1-do^1-si$  с тетра хордом средних дает дорийский лад:  $mi^1-re^1-do^1-si-ля-соль-фа-mi$ . Перенос верхнего тетра хорда вниз дает гипердорийский, или миксолидийский лад:  $си-ля-соль-фа-mi-re-do-Si$ . Наоборот, перенос нижнего тетра хорда вверх приводит к гиподорийскому, или эолийскому ладу:  $ля^1-соль^1-фа^1-mi^1-re^1-do^1-си-ля$ . Последовательность  $re^1-do^1-си-ля$  («фригийский тетра хорд») в соединении с лежащей ниже последовательностью  $соль-фа-mi-re$  давала фригийский лад  $re^1-do^1-си-ля-соль-фа-mi-re$  — и точно так же могли образовываться гипофригийский и гиперфригийский лады. Аналогично получался лидийский лад  $do^1-си-ля-соль-фа-mi-re-do$  с его обращениями. Заметим, что древние греки оценивали лады совсем не так, как мы сейчас. Например, лидийский лад считался скорбным, жалобным, интимным. Но по звуковому составу этот лад совпадает с гаммой  $do$ -мажор, которая, начиная с раннего средневековья, ассоциируется со светлым, приподнятым настроением! В средние века теория музыки заимствовала древнегреческие названия ладов, однако закрепила их совсем за другими ладами, чем изначально. Соответственно, и характер звучания стал оцениваться с новой точки зрения — на основе гармонии, а не тетра хордовых структур.

Как правило, античные лады переносились в октаву  $mi-mi^1$  (чтобы  $ме$  оставалась посередине). Поэтому лидийский лад выглядел следующим образом:  $mi-фа\#-соль\#-ля-си-do\#^1-re\#^1-mi^1$ . Видно, что переход к другому ладу сохраняет крайние звуки тетра хордов, но меняет интервалы внутри тетра хорда — поэтому средние звуки назывались «подвижными». Исполнители могли изменять положение



средних звуков тетрахорда для достижения специального художественного эффекта. Понижение второй (сверху) ступени обычного диатонического тетрахорда *ля–соль–фа–ми* дает «хроматический» тетрахорд *ля–сольь–фа–ми*. Дальнейшее понижение обоих средних звуков приводило к интервалам, меньшим полутона *фа–ми* («энгармонические» тетрахорды). Использование такого рода украшений характерно для музыки знаменитого древнегреческого драматурга и музыканта Еврипида (конец V века до н. э.), театральные постановки которого были особенно пронизаны музыкой. В IV веке до н. э. Аристоксен и его последователи сделали обычным употребление хроматических и энгармонических «родов» — однако «полная неизменная система» оставалась основой греческой музыки на протяжении четырех веков, с VI по II век до н. э.

#### 4. Пифагоров строй

Их Пифагор считал. В чем их секрет?

*У. Б. Йеймс*

Формирование «полной неизменной системы» предполагало усиление роли интервального слуха в музыке: звуки все еще сохраняли свою «индивидуальность», абсолютную высоту — однако на первый план начали выходить их отношения к другим звукам, музыкальные интервалы. И главными интервалами стали кварта и квинта, определяющие положения «неподвижных» ступеней тетрахордов. Средние звуки тетрахорда не отличались такой определенностью. Естественно было попытаться установить их положения теоретически, исходя из уже устоявшихся интервалов квинты и кварты. Такая попытка была предпринята философом Пифагором Самосским (VI век до н. э.) и его учениками. Пифагор обратил внимание на то, что октава, квинта или кварта, отложенные от *любого* звука, воспринимаются как октава, квинта и кварта. Экспериментируя с натянутой струной, Пифагор заметил, что половина струны издает звук на октаву выше звука от целой струны, а деление струны в отношении 3 : 2 подобно тому как мера делит интервал между нэтой и гипатой. По сути дела, было показано, что суммированию музыкальных интервалов отвечает умно-

жение соответствующих отношений: кварта и квинта дают в сумме октаву,

$$(4 : 3) \cdot (3 : 2) = 2 : 1$$

Поэтому откладывание квинты вверх эквивалентно откладыванию кварты вниз (при условии отождествления звуков, различающихся на октаву). Идея Пифагора состояла в том, что единую шкалу — звукоряд — образуют звуки, полученные откладыванием от некоторого исходного звука любого количества квинт вверх и вниз, с переносом получающихся нот во все октавы. Вплоть до наших дней идея квинтового расположения нот звукоряда владеет умами многих музыковедов. Существовало предание, что струны лиры Орфея были настроены в пифагоровом строе. В раннем средневековье этот строй был основой настройки музыкальных инструментов, был одобрен церковной догматикой.

«Все — число и гармония», — было основным положением учения пифагорейцев. Те же отношения, что были положены в основу музыкальной шкалы, предполагалось найти и в расположении небесных тел. Отсюда — гармония небесных сфер, которую, как утверждали пифагорейцы, мог слышать Пифагор. Часто звукоряд «полной неизменной системы» соотносился со «стихиями» античной философии. Так, Аристид Квинтилиан писал: «Мы обнаруживаем, что пять стихий соответствуют таким тетра хордам: тетра хорду нижних — Земля, как самая низкая; тетра хорду средних — Вода, как самая близкая к Земле; тетра хорду соединенных — Воздух, ибо он, нисходя и опускаясь, вошел в морские глубины и норы Земли; Огонь отвечает тетра хорду разделенных, ибо для его природы перемещение вниз не свойственно, естествен же сладостный для него переход вверх; тетра хорду верхних предназначается соответствие Эфиру, как того, который должен относиться к краю мира». В древнейшие времена похожие идеи появились и в Китае. В книге Тцо-Киц-Минга, друга знаменитого философа Кун-Цзы (Конфуция), за 500 лет до нашей эры, пять тонов древнего китайского звукоряда сравниваются с пятью элементами китайской натуральной философии: водою, огнем, деревом, металлом, землю. Целые числа 1, 2, 3, 4, 5 описываются как источники всякого совершенства. Впоследствии появилось сопоставление 12 полутонов в октаве с 12 месяцами года. Подобные «магические» соотношения тонов, созвездий, времен года и т. п. характерны для средневекового мышления. Не избежал поисков «гармонии сфер» и такой глубоко-

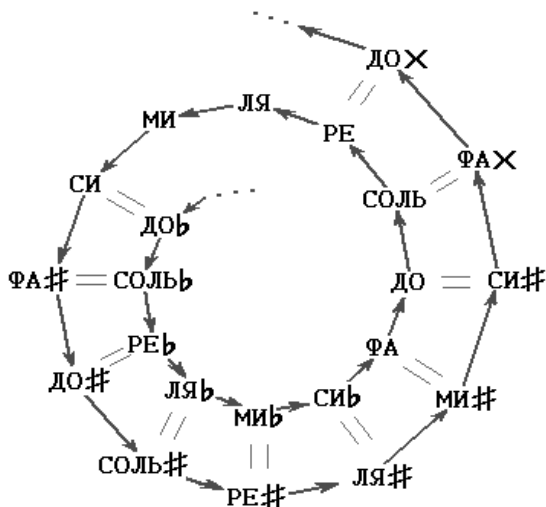
научный ум, как Иоганн Кеплер. В XVIII веке широко обсуждалось соответствие 7 нот диатонического звукоряда 7 цветам радуги — во многом такое прямое сопоставление порождает и сейчас «психоделические» технологии в цветомузыке. Трудно сказать, почему Пифагор не стал использовать интервалы, образуемые более высокими обертонами струны (например,  $5 : 4$  — большая терция). По-видимому, это связано с отсутствием резонаторов, поддерживающих пятую гармонику, с одноголосием античной музыки и с тетрахордовой традицией, с фундаментальной ролью квинты и кварты в построении «полной и совершенной системы».

Построим теперь звукоряд пифагорова строя. Квинта вверх от основного тона дает интервал  $3 : 2$ , квинта вниз с переносом в первую октаву — интервал кварты,  $4 : 3$ . Квинта вверх от квинты,  $(3 : 2) \cdot (3 : 2) = (9 : 4)$ , — переносится на октаву вниз и дает ступень  $9 : 8$  (*большая секунда*). Обращение большой секунды (дополнение до октавы) соответствует откладыванию двух квинт вниз и дает ступень звукоряда  $16 : 9$ . Откладывание трех квинт вверх и вниз приводит к звукоряду

1	$9 : 8$	$32 : 27$	$4 : 3$	$3 : 2$	$27 : 16$	$16 : 9$	2
<i>до</i>	<i>ре</i>	<i>ми</i>	<i>фа</i>	<i>соль</i>	<i>ля</i>	<i>си</i>	<i>до</i>
$9 : 8$	$256 : 243$	$27 : 24$	$9 : 8$	$27 : 24$	$256 : 243$	$9 : 8$	

Внизу указаны интервалы между соседними ступенями звукоряда. Разумеется, можно продолжать этот процесс и дальше, получая все новые ступени звукоряда. Всякому, кто заглядывал в учебник по элементарной теории музыки, знаком так называемый «квинтовый круг» (рис. 6). Как и натуральный, пифагоров звукоряд содержит, в принципе, бесконечное число ступеней. Когда следует прекратить процесс откладывания квинт? Пифагор остановился тогда, когда получил столько звуков, сколько содержалось в «полной и совершенной системе». Другой критерий — малое различие высот крайних нот в квинтовом ряде (приблизительное «замыкание» его в «квинтовый круг»). Легко видеть, что точного замыкания быть не может. Действительно, это означало бы, что  $(3 : 2)^n = 2^m$ , то есть  $3^n = 2^{m+n}$  — но четное число не может быть равно нечетному!

Тем не менее, приближенные замыкания квинтового ряда вполне возможны. Первым кандидатом служит пятая квинта:  $(3 : 2)^5 = 243 : 32$  при переносе в первую октаву дает  $243 : 128$ , что отличается от 2 на



**Рис. 6 — Квинтовый круг**

Движение по стрелке — это откладывание интервала квинты вверх (или кварты вниз). В 12-ступенном строе каждые 12 шагов по квинтовому кругу приводят к звуку, энгармонически равному исходной точке. В классической гармонии расстояние вдоль квинтового круга определяет степень родства тональностей. Например, *до*-мажор ближе к *фа*-мажору, чем к *си*-мажору. Считается, что удаление от центра *ля* в сторону диэзов делает тональность звучащей более напряженно, а движение в сторону бемолей, наоборот, придает тональности более расслабленный характер (при том же наклонении — мажор, минор).

5.3 %. Это довольно грубое совпадение, но все же звукоряды из пяти звуков (пентатоника) были широко распространены в древности и сохранились до сих пор в традиционной музыке многих народов. Следующий шаг — 7 ступеней:

$$(3 : 2)^7 = 2187 : 128 \rightarrow 2187 : 2048 = 1 + 139 : 2024 \approx 1.068$$

Семиступенные (диатонические) звукоряды сформировались и были широко распространены в средние века. Названия их восходят к тетрахордовым интонациям, характерным для музыки разных областей Древней Греции: ионийский, дорийский, эолийский и др. И в наши дни диатонические звукоряды играют важную роль в музыке — к диатонике восходят сами названия нот и система нотной записи!

Следующей точкой замыкания квинтового ряда будет 12-я квинта от основного тона:

$$(3 : 2)^{12} = 531441 : 4096 \rightarrow 531441 : 524288 = 1 + 7153 : 524288$$

Точное значение этого отношения с восемью значащими цифрами — 1.0136432. Пифагор оценил его отношением  $74 : 73 \approx 1.0136986$ , с довольно хорошей точностью. Интервал  $74 : 73$  называется пифагоровой коммой — и вплоть до XVII века считалось, что именно этой величиной определяется отличие 12-й квинты от октавы.

## 5. Другие математические строи

Квинты резко дребезжат,  
Сыплют дробью звуки...  
Звуки ноют и визжат  
Словно стоны муки...  
Смолкни квинта злая!

*Аполлон Григорьев*

Пифагоров строй мог существовать только в условиях одноголосья, поскольку единственными интервалами, которые можно в нем исполнить в одновременном звучании являются октава, квинта и кварта (не считая, конечно, унисона — две ноты одинаковой высоты). Такой важный для построения аккордов и выделения гармонических функций интервал как большая терция в пифагоровом строе звучит очень напряженно, диссонантно. Развитие гармонического мышления потребовало решения этой проблемы.

Еще в Древней Греции возникли музыкальные системы, отличные от пифагорова строя. Например, Архитом (IV в. до н. э.) было введено определение большой терции (интервал между *до* и *ми*) отношением частот  $5 : 4$ . Во II в. до н. э. Дидимом была предпринята попытка построения звукоряда по методу Пифагора, но с откладыванием не квинты, а большой терции — однако получающиеся при этом плохие квинты и кварты не дали развить эту идею. К тому же античная музыка была строго одноголосной: звуки соединялись только в следовании один за другим, в мелодии. Поэтому терции не играли в музыке заметной роли.

Средневековый теоретик Джозеффо Царлино (1517–1590) выдвинул мысль о том, что наиболее гармоничны те интервалы, которые задаются отношениями небольших целых чисел. В частности, вместо пифагоровой большой терции  $81 : 64$  предлагалось использовать «акустически чистую» терцию  $5 : 4$ . Опираясь на труды Птолемея, Царлино и еще один теоретик XVI века Фольяни предложили звукоряд, который получил название «чистого» строя: он включает отложенные от основного тона октаву, квинту и кварту, а также большие терции от основного тона, квинты и кварты. Легко видеть, что этот звукоряд содержит ступени

1	$9 : 8$	$5 : 4$	$4 : 3$	$3 : 2$	$5 : 3$	$15 : 8$	2
<i>до</i>	<i>ре</i>	<i>ми</i>	<i>фа</i>	<i>соль</i>	<i>ля</i>	<i>си</i>	<i>до</i> <sup>1</sup>
$9 : 8$	$10 : 9$	$16 : 15$	$9 : 8$	$10 : 9$	$9 : 8$	$16 : 15$	

В «чистом» строе ступень *ми* оказывалась существенно ниже пифагоровой, а интервалы *ре–ми* и *ми–фа* были, соответственно, уже и шире, чем в пифагоровом строе. В начале XVIII века один из крупнейших музыкантов того времени Жан-Филипп Рамо (1683–1764) дал теоретическое обоснование чистого строя, обратив внимание на обертоновую структуру музыкального звука. Он указывал, что характерные для музыки того времени интонации связаны с интервалами между гармониками, с первой по десятую, кроме седьмой. Впоследствии мы увидим, что именно эти гармоники определяют основные черты зарождавшегося тогда нового, 12-ступенного строя.

В чистом строе, как и в пифагоровом, интервалы между соседними ступенями звукоряда оказываются неодинаковыми. А это означает, что нельзя в чистом строе откладывать любые интервалы от любых ступеней звукоряда. Например, если отложить интервал  $9 : 8$  (большая секунда) от второй ступени «чистого» звукоряда, получится ступень  $81 : 64 = (5 : 4) \cdot (81 : 80)$ , то есть выше третьей ступени чистого строя на интервал  $81 : 80$ , называемый дидимовой коммой. Интервал между *ре* и *ля* чистого строя дает отношение  $40 : 27 = (3 : 2) \cdot (81 : 80)$  — звучание его сравнивалось с волчьим воем, и термины «волчья квинта» и «волк» вошли в музыкальную терминологию того времени.

Для того, чтобы темперировать («умерить», «сгладить») пифагоров или «чистый» звукоряд, приходилось прибегать к «комметизации» — то есть искусственному небольшому повышению или понижению отдельных ступеней звукоряда (на величину коммы) при игре в ряде

тональностей. Свободного перехода (модуляции) от одной тональности к другой быть не могло. Замечательные музыканты (Палестрина, Монтеверди, Рамо) и выдающиеся представители точных наук (Л. Эйлер, М. Мерсенн, Ж. Совер, д'Аламбер) пытались усовершенствовать известные музыкальные системы. Одним из путей преодоления трудностей с «волками» казалось увеличение числа ступеней в октаве. Было предложено большое количество «математических» строев с разным числом ступеней: Царлино (XVI в.) — 16 ступеней, Дони (1635) — 20, Меркатор (1725) — 53, и т. д. Изготавливались клавишные инструменты с разным числом клавиш на октаву (вплоть до 31). Появлялись такие строи и позже, в XIX и XX веках. Идея Царлино об отношениях малых чисел оказалась очень живучей — и даже в наши дни многие музыканты считают «простые» отношения критерием гармоничности. Однако предъявляемые музыкальной практикой к звукоряду требования заставили музыкантов уйти от «чистоты» интонирования отдельных интервалов — но сделать более гармоничным звучание музыки как целого. Уже в процедуре комметизации простые отношения отходили на второй план, по сравнению с качеством звучания. Впоследствии комму стали дробить и разными способами распределять между ступенями звукоряда. Такая «средне-тоновая темперация» получила широкое распространение в органно-клавирном исполнительстве XVI–XVII веков. Появлялись строи, позволяющие играть в довольно широком круге тональностей, но в каких-то случаях «волк» все-таки возникал.

Проблема темперации вызвала споры о размерах большой и малой терций. В гармонии различаются мажорное и минорное трезвучия, составленные из одновременно звучащих основного тона и квинты, а между ними — большой или малой терции соответственно. «Чистая» большая терция задается отношением частот  $5 : 4$ , а «чистая» малая терция после работ Царлино стала связываться с отношением  $6 : 5$ . Уменьшение размера терции в аккорде приводит к переходу от светлого и бодрого звучания к грустному и задумчивому. Натуральный звукоряд и пифагоров строй не содержат малой терции. Долгое время она считалась «ущербной», по сравнению с большой — и даже в минорных сочинениях композиторы долго предпочитали заканчивать произведение мажорным аккордом, чтобы создать чувство достаточной завершенности.

В XIX веке Гельмгольц указал на возможность возникновения в нелинейной среде (какой является человеческий мозг) биений между высшими гармониками — то есть разностных колебаний с частотой от единиц до нескольких десятков Герц. Именно большим количеством таких биений объяснялось более «темное» звучание малой терции. Вслед за Ж.-Ф. Рамо, который говорил, что мажорная гармония «дана в резонансе звучащего тела», Гельмгольц считал, что «мажорный аккорд наиболее натурален из всех аккордов». Однако в музыкальной практике уже с XVIII века минорное трезвучие стало использоваться на равных с мажорным. Дело, следовательно, не в обертоновом составе, а в строении самой основы музыки — звукоряда. Лишь по отношению к определенному строю можно говорить о характере звучания различных созвучий.

В чистом строе можно построить малые терции *ля–до*, *ми–соль* и *си–ре*. Однако существует лишь два минорных аккорда: *ля–до–ми* и *ми–соль–си*, потому что квинта *си–фа* оказывается «волчьей». На второй ступени звукоряда (*ре*) нельзя построить ни квинты, ни терции. Тем более осложнялось положение при использовании альтерированных звуков. Требования мелодики и гармонии в отношении терций противоречили друг другу. Попытки построения универсального звукоряда с сохранением «чистоты» интервалов зашли в тупик. Понадобилось принципиально новое решение — и этим решением стал 12-ступенный равномерно темперированный звукоряд.



# РАВНОМЕРНО ТЕМПЕРИРОВАННЫЙ СТРОЙ

Слушайте! Слышите, как ворвалась и окрепла новая тема?

*Сесил Дей-Льюис*

## 1. Становление 12-ступенного строя

...голоса то звучат, отдаляясь друг от друга на большее или меньшее расстояние, то, напротив, сходятся друг с другом, согласно некоторым разумным законам музыкального искусства, по отдельным ладам, создавая какую-то естественную прелесть.

*Иоанн Скотт Эриугена*

Переход от пентатоники к диатонике в европейской музыке произошел достаточно быстро, в течение двух-трех веков. Для перехода же на следующую ступень, к 12-ступенному звукоряду, потребовалось около двух тысячелетий. Подобное соотношение указывает на родственность пентатоники и диатоники — и принципиальное отличие от них нового строя. В последней главе мы увидим, в чем состоит это различие. Здесь же отметим только, что для выделения 12-ступенного звукоряда потребовалось освоение еще одного измерения — переход от последовательности звуков к последовательности созвучий, от мелодики к гармонии.

Первые указания на возможность многоголосия восходят ко II веку до н. э. (Дидим). Разумеется, отдельные явления гетерофонии (то есть сочетания разных голосов) свойственны народной музыке с древнейших времен. Однако *противопоставление* голосов, подчеркивание именно процессов их разделения и соединения как сознательный художественный прием зарождается лишь в VIII–IX веках. В VII веке

появляются первые органы, которые быстро занимают важное место в церковных обрядах. Сильное различие в окраске звучания хора и органа, сопровождающего его пение, наталкивали на мысль о возможном различии поручаемых им мелодий. Поначалу мелодия органа лишь следовала за вокальной партией, на расстоянии октавы, квинты или кварты. Такой «присоединенный» голос назывался органалисом. Но уже к XII веку новый голос обретает самостоятельность, в том числе ритмическую: на одну ноту хорала приходится довольно развернутая мелодия органалиса. В XIII веке многоголосие получает развитие в творчестве Перотина Великого, который свободно использует самые различные музыкальные интервалы в трех- и четырехголосных сочинениях. К XIV веку полифония становится нормой музыкального мышления.

Однако законы сочетания звуков по вертикали отличаются от законов мелодического движения. Если в мелодии существенно было прежде всего положение устоев и тяготения к ним, в гармонии на первый план выступают понятия консонанса и диссонанса. В пифагоровом строе терция *ми* достаточно близка к устою *фа*, чтобы подчеркнуть тяготение вверх. Однако для гармонии нужно, наоборот, понизить терцию, чтобы не возникало диссонансов с другими голосами. Огромное количество подобных противоречий заставило музыкантов пойти на определенный компромисс, изменяя как мелодические интонации, так и звучание аккордов.

Идея равномерной шкалы возникла еще в IV веке до н. э. у Аристоксена, основателя школы «гармоников». Аристоксен предложил считать, что в тетра хорде *ля–соль–фа–ми* интервал *фа–ми* вдвое уже интервалов *ля–соль* и *соль–фа*, так что вместо тетра хорды можно было бы использовать последовательность шести ступеней звукоряда (*ля–ляб–соль–сольб–фа–ми*), с одинаковыми расстояниями между соседними ступенями. Ясно, что октава разбивается в таком случае на 12 равных интервалов.

Гениальная догадка Аристоксена не могла получить поддержки в условиях одноголосия. Лишь в XV веке испанец Рамос де Пареха (ок. 1440–1471) отметил, что, при введении чистой терции в строй органа, для сочетания требований мелодики и гармонии, необходимо

изменить высоты всех ступеней звукоряда, и квинты в том числе. К тому времени чистые квинта и кварта уже не удовлетворяли эстетические запросы слуха, воспитанного на многоголосии, — и одним из основных правил полифонии строгого письма стал запрет «выпячивания» квинт и кварта в совместном движении голосов. Однако до полного признания «темперированной» квинты было еще далеко.

С развитием ансамблевого исполнительства и все более свободным использованием в музыке «хроматических» интервалов (повышенных или пониженных по сравнению с соответствующей ступенью лада) неравномерно темперированный строй органов и клавира стал препятствовать дальнейшему обогащению выразительных средств музыкального искусства. Так, в неравномерно темперированных строях ноты *соль#* и *ляб* не могли использоваться в одной тональности. Известны попытки сочинять «энгармоническую» музыку, с одновременным использованием такого рода нот, в рамках неравномерно темперированного звукоряда: до нас дошел концерт, созданный видным болонским теоретиком, музыкальным писателем, композитором, органистом и клавиристом Адриано Банкери (1568–1634). Музыкальные теоретики XVI века (например, флорентиец Арон, 1480 или 1490–1545) для сохранения «чистоты» строя настойчиво рекомендовали «расщеплять» клавиши *соль#* и *миб* на две полу-клавиши. Однако уже в 1533 году, через десять лет после выхода в свет «Музыкального тосканца» Арона, в небольшом итальянском городке Брешия было опубликовано методическое руководство Джованни Мария Ланфранко, названное «Наука музыки». В нем впервые была дана новая система темперации и усовершенствованные методы настройки клавишных инструментов. Эта система отличалась от всех прежних попыток темперации. Сохранив деление октавы на 12 ступеней, она впервые ввела в органно-клавирное исполнительство энгармонические звуки, имеющие разное название при одинаковой высоте: *до#* и *реб*, *ре#* и *миб* и т. д. При этом *ми#* отождествлялось с *фа*, а *си#* с *до*<sup>1</sup>. Введение такого строя в клавирную практику во многом было вызвано влиянием лютневого исполнительства, в котором такого рода настройка применялась еще раньше. Ланфранко и его

единомышленники уже в первой половине XVI века стали темперировать все ступени звукоряда, кроме октавы.

Появление «энгармонического» строя вызвало сильное противодействие со стороны многих музыкантов. Интонационность новой музыки сильно противоречила традиционному тогда эмоционально сдержанному стилю исполнения музыки. Не одобряла «энгармоническую» музыку и церковь. Противники равномерно темперированного строя во главе с Царлино утверждали, что музыка должна сдерживать необузданные порывы души и направлять к спокойной благопристойной жизни. Царлино с чувством глубокого негодования говорил о музыкантах, которые «по прихоти или шутки ради, а, может быть, и для того, чтобы морочить мозги певцам, имеют привычку транспонировать лады вверх и вниз на один тон или какой-нибудь другой интервал, введя не только хром, но и энгармонические ступени, вместо того, чтобы, когда это потребуется, удобно переместить все тоны и полутоны соответственно строению лада» (как требует звукоряд неравномерно темперированного строя).

Длительная борьба сторонников «чистых» интервалов против «энгармонического» строя продолжалась до конца XVIII века. Но выступления музыкальных авторитетов, равно как и создание все новых инструментов с «расщепленными» клавишами, не могли сдерживать распространение нового звукоряда. Музыканты и композиторы постепенно осваивали интонационные возможности «энгармонического» строя. Особенно способствовало его внедрению быстрое развитие с конца XVI века новой области музыкального искусства — оперы, включившей клавишные инструменты в состав оперного оркестра (Пери (1561–1633), Кл. Монтеверди (1561–1643), Дж. Фрескобальди (1583–1643)) — и обострившей проблему совмещения вокальной музыки с инструментами фиксированной настройки. В 1636 году Марен Мерсенн опубликовал фундаментальное исследование, в котором показал, что в темперированном строе «чистые» интервалы всегда воспроизводятся лишь приближенно, — и предложил равномерно темперированные звукоряды с числом ступеней 12, 26 и 31. За его страсть к точным исследованиям в теории музыки и соот-

ветствующую манеру музыкального письма противники называли Мерсенна музыкальным геометром.

## 2. Строение звукоряда

О музыке на первом месте  
Предпочитай размер такой,  
Что зыбок, растворим и вместе  
Не давит строгой полнотой.

*Поль Верлен*

Как мы уже знаем, интервал между двумя музыкальными звуками задается отношением частот их основных тонов. Сложение интервалов означает перемножение соответствующих отношений частот, вычитание интервалов отвечает делению отношений. До XVII века математика опиралась в основном на рациональные числа — и в теории музыки нельзя было ожидать чего-то другого. Создание математики действительных чисел и изучение свойств элементарных функций позволило дать простое теоретическое описание равномерно темперированного 12-ступенного звукоряда.

Прежде всего заметим, что высоту музыкального звука удобно представлять *логарифмом* частоты его основного тона:

$$h = \log f.$$

Точно так же, интервал представляется не отношением частот, а его логарифмом. Используя известные свойства логарифмов, получим:

$$\log (f_1 : f_2) = \log f_1 - \log f_2 = h_1 - h_2,$$

то есть величины интервалов в такой логарифмической шкале вычисляются просто как разности высот соответствующих нот. Сложению интервалов соответствует сложение их величин в логарифмической шкале, вычитание величин интервалов отвечает разности интервалов.

По какому основанию берется логарифм? С точки зрения свойств сложения и вычитания интервалов, это безразлично. Однако, если мы хотим принять за единицу интервал октавы, то надо, чтобы

$$\log (2 : 1) = \log 2 = 1.$$

А это означает, что следует взять логарифм по основанию 2, то есть

$$h = \log_2 f.$$

В дальнейшем мы всегда будем определять высоту нот именно двоичными логарифмами — и не требуется каждый раз явно указывать основание.

Теперь можно очень просто выразить требование равномерной температуры звукоряда: надо октаву (отрезок от 0 до 1) разделить на 12 равных частей. Полученные точки и дадут высоты ступеней звукоряда: ступень с номером  $s$  имеет высоту  $s/12$ . Легко вычислить (при помощи обычного калькулятора) высоты ступеней равномерно темперированного звукоряда — и сравнить их с высотами ступеней пифагорова и чистого строев, а также с натуральными интервалами:

	<i>Равном. темп.</i>	<i>Пифагоров</i>	<i>«Чистый»</i>	<i>Натур.</i>	
	<i>строй</i>	<i>строй</i>	<i>строй</i>	<i>звукоряд</i>	
<i>до</i>	0.0000	0.0000 <sub>1:1</sub>	0.0000 <sub>1:1</sub>	0.0000 <sub>1:1</sub>	прима
<i>ре♭</i>	0.0833	0.0752 <sub>2<sup>8</sup>:3<sup>5</sup></sub>	0.0589 <sub>25:24</sub>		} малая секунда
<i>до♯</i>	0.0833	0.0947 <sub>3<sup>7</sup>:2<sup>11</sup></sub>		0.0931 <sub>16:15</sub>	
<i>ре</i>	0.1667	0.1699 <sub>9:8</sub>	0.1699 <sub>9:8</sub>	0.1699 <sub>9:8</sub>	большая секунда
<i>ми♭</i>	0.2500	0.2451 <sub>32:27</sub>			} малая терция
<i>ре♯</i>	0.2500	0.2647 <sub>9<sup>9</sup>:2<sup>14</sup></sub>	0.2630 <sub>6:5</sub>	0.2630 <sub>6:5</sub>	
<i>ми</i>	0.3333	0.3399 <sub>81:64</sub>	0.3219 <sub>5:4</sub>	0.3219 <sub>5:4</sub>	большая терция
<i>фа</i>	0.4167	0.4150 <sub>4:3</sub>	0.4150 <sub>4:3</sub>	0.4594 <sub>11:8</sub>	кварта
<i>соль♭</i>	0.5000	0.4902 <sub>2<sup>10</sup>:3<sup>6</sup></sub>			} тритон
<i>фа♯</i>	0.5000	0.5098 <sub>3<sup>6</sup>:2<sup>9</sup></sub>	0.4919 <sub>45:32</sub>	0.4854 <sub>7:5</sub>	
<i>соль</i>	0.5833	0.5850 <sub>3:2</sub>	0.5850 <sub>3:2</sub>	0.5850 <sub>3:2</sub>	квинта
<i>ля♭</i>	0.6667	0.6601 <sub>2<sup>7</sup>:3<sup>4</sup></sub>			} малая секста
<i>соль♯</i>	0.6667	0.6797 <sub>3<sup>8</sup>:2<sup>12</sup></sub>	0.6781 <sub>8:5</sub>	0.6781 <sub>8:5</sub>	
<i>ля</i>	0.7500	0.7549 <sub>27:16</sub>	0.7370 <sub>5:3</sub>	0.7370 <sub>5:3</sub>	большая секста
<i>си♭</i>	0.8333	0.8301 <sub>16:9</sub>		0.8074 <sub>7:4</sub>	} (малая) септима
<i>ля♯</i>	0.8333	0.8496 <sub>3<sup>10</sup>:2<sup>15</sup></sub>	0.8480 <sub>9:5</sub>		
<i>си</i>	0.9167	0.9248 <sub>3<sup>5</sup>:2<sup>7</sup></sub>	0.9069 <sub>15:8</sub>	0.9069 <sub>15:8</sub>	большая септима
<i>до<sup>1</sup></i>	1.0000	1.0000 <sub>2:1</sub>	1.0000 <sub>2:1</sub>	1.0000 <sub>2:1</sub>	октава

Видно, что энгармонические при равномерной температуре звуки в пифагоровом строе различаются на 0.0196 — величина пифагоровой коммы. Благодаря распределению дидимовой коммы по всем ступеням звукоряда, в 12-ступенном строе исчезли «волчьи» квинты, кварты и терции. Звукоряд стал в полной мере универсальным: любая мелодия

может быть перенесена вверх или вниз на любое число ступеней и сохранит при этом все отношения между ее звуками, все интервалы — то есть, в конечном итоге, характер звучания. Стало возможным свободное использование гармонии: любой аккорд может быть построен на любой ступени звукоряда, независимо от лада и тональности. Таким образом, становление 12-ступенного строя значительно обогатило арсенал выразительных средств музыки.

Логарифмическая шкала была детально изучена лишь в конце XVII века немецким ученым и музыкантом Веркмейстером — и развита далее его учеником Нейдгардтом. По-видимому, тогда же в Германии стали появляться органы, настроенные в равномерной темперации. Так, известный органный мастер А.Шнитгер построил темперированный орган специально для прославленного органиста С.Якоби. Однако лишь в XVIII веке, во многом благодаря работам И.С.Баха, 12-ступенный строй стал принят большинством музыкантов.

Становление равномерно-темперированного строя сопровождалось обострением интереса к его математическим и акустическим основам. «Математика — это душа музыки,» — утверждали некоторые теоретики и превозносили «вечные законы математических пропорций», полагая, что нужно «превратить музыку в отрасль математики». Однако многие композиторы, исполнители и видные теоретики и публицисты восставали против «математических увлечений» — причисляя иногда к ним и равномерную темперацию. Среди противников равномерно-темперированного строя был, например, известный французский философ-просветитель Дени Дидро.

Неравномерно-темперированные строи продолжали существовать во всех странах Европы в течение всего XVIII века. Из великих композиторов, живших в эпоху становления классической западноевропейской музыки, сторонником «чистого» строя был Г.Гендель. Стремясь к «чистоте» интонирования интервалов, он играл на специально сконструированном для него органе, с добавочными клавишами в октаве для подчистки неискоренимой фальши в аккордах. И все же наступление равномерной темперации продолжалось.

Гениальный немецкий композитор и музыкант Иоганн Себастьян Бах (1685–1750) в своей борьбе за внедрение равномерно-темперированного строя не ограничивался областью музыкальной педагогики — он хотел воздействовать и на тех, «кто уже искусен в музыке», для чего и создал свой первый сборник из 48 прелюдий и фуг для «хорошо

темперированного клавира». В этом сборнике, ставшем хрестоматийным, Бах с огромным художественным мастерством доказал возможность композиции во всех мажорных и минорных тональностях без возникновения нежелательных диссонансов. Однако, если клавикорды и клавишины можно было легко настроить в равномерно-темперированном строе, оставалось еще большое количество старых органов, сочинения для которых и у И. С. Баха во многом следуют канонам «чистого» строя.

Наряду с И. С. Бахом, внедрением в музыкальную практику нового строя занимались и другие музыканты. И. Маттесон предлагал ввести равномерно темперированный строй в музыкальную педагогику, приучая детей с первых же шагов в музыке к звучанию этого строя. Наиболее распространенные руководства того времени: «Искусство игры на клавишине» Ф. Куперена, «Об истинном искусстве игры на клавише» К. Ф. Э. Баха и другие — подготовили молодых музыкантов к отказу от неравномерной темперации и утверждению нового музыкального мышления.

### 3. Поиски других возможностей

Кто играет  
Музыку эту,  
Жгучими звуками  
Боль причиняя?

*Вильгельм Эклунд*

Известный русский композитор XX века С. С. Прокофьев в полемике о возможностях 12-ступенной шкалы приводил следующие комбинаторные доводы.

При составлении мелодии для нашего слуха привычен ход от данного тона (ноты) вверх или вниз к тону, отстоящему обычно не далее, чем на 12 ступеней (хотя в современной музыке широко используются и большие интервалы — например, в речитативных ариях). Значит, если мы взяли какой-либо тон, то мы можем взять его повторно, либо взять любую из ближайших 24-х ступеней звукоряда:  $12 \leftarrow 1 \rightarrow 12$ . Таким образом, для последовательного воспроизведения двух звуков нам предоставляется выбор из  $1 \times 25$  возможностей, для



трех звуков —  $1 \times 25 \times 25$  и т. д. Следовательно, при составлении коротенькой мелодии из 8 нот (как, например, для строки «Ах вы сени, мои сени...») производится выборка из  $1 \times 25^7 \approx 6 \cdot 10^9$  сочетаний. То есть имеется около 6 миллиардов вариантов мелодии из 8 нот (не считая при этом ритмического оформления, которое существенно влияет на восприятие мелодии). Большинство из них будет звучать весьма непривычно для нашего уха — однако в современной алеаторической («вероятностной») музыке именно такие звукосочетания несут художественную нагрузку. Учитывая также различные варианты гармонизации, можно полагать, что возможности 12-ступенного строя практически неисчерпаемы.

На самом деле, это не совсем так, поскольку, как мы увидим далее, для каждого строя характерны свои звуковысотные структуры (например, лад и тональность); они определяют мелодические тяготения и возможные последовательности гармоний, так что музыкальное движение становится не таким уж произвольным. Возникновение нехарактерных для данного строя оборотов всегда связано с «моделированием» в его рамках какого-либо другого строя. Далеко не всякий строй может быть «промоделирован» в 12-ступенном темперированном звукоряде, что ощущалось некоторыми музыкантами как внутренне присущая 12-ступенному строю «фальшь». Так, Э. К. Розанов писал в 1925 году: «Замена 7-го, 11-го и 13-го обертонов нашими мнимыми близлежащими ступенями является грубой фальсификацией, для исправления которой наше слуховое восприятие не имеет никаких данных... Но существенные недостатки этой фальсификации не могут с течением времени по мере развития и обострения слуха не обнаружиться, как это бывает со всеми фальсификациями». А. М. Аврамов (1911) отмечал, что темперированный строй «нарастил на наш слуховой аппарат вековые мозоли». Не любил равномерной темперации и П. И. Чайковский — он сам настраивал свой рояль по «чистым» интервалам.

Противоречит интонациям 12-ступенного строя традиционная настройка смычковых инструментов (скрипки, альты, виолончели, контрабаса) по чистым квинтам — слух исполнителя привыкает к их звучанию, и музыкант уже не может «протемперировать» в своем исполнении квинты и кварты — а значит, и все другие интервалы интонируются в соответствии с величиной квинт. Во многом интона-

ционный строй классического скрипичного исполнительства близок к пифагоровому.

Имеются значительные трудности в интонировании темперированных интервалов и на духовых инструментах. При оркестровом исполнении музыкальных произведений, широко использующих контрасты тональностей и тонкие нюансы в мелодике, перед дирижером стоит весьма сложная задача: найти такой компромисс между интонациями разных инструментов, который максимально сохранил бы живое движение мелодии, не нарушая гармонического замысла.

Казалось бы: а почему не перейти к точному исполнению в 12-ступенном строе? В конце концов, он и возник из стремления соединить мелодику и гармонию. Однако тот вариант темперации, который дает 12-ступенный строй, не всегда отвечает решению художественных задач. Например, при движении вверх в последовательности *до-ре#-ми*, звук *ре#* сильно тяготееет в *ми* — и в исполнении на скрипке легко подчеркнуть это тяготение, слегка приблизив *ре#* к *ми*. Наоборот, последовательность *фа-миб-ре* предполагает сильное тяготение *ми*, в *ре*, которое подчеркивается дополнительным понижением звука *миб*. Оказывается, что для интонационного слуха звук *миб*, должен быть ниже, чем *ре#*. В 12-ступенном же строе эти ступени совпадают — и никаким образом нельзя воспроизвести правильную интонацию на инструменте с фиксированной настройкой (например, фортепиано).

В современной музыке очень широко используются интервалы, меньшие 12-ступенного полутона. Для обозначения соответствующих звуков применяются знаки  $\sharp$  (полудиез),  $\flat$  (полубемоль) и другие. Разумеется, исполнение таких интонаций невозможно в 12-ступенном строе. Таким образом, 12-ступенный звукоряд не всегда позволяет правильно исполнять узкие интервалы.

С другой стороны, в больших масштабах, тоже не все гладко. Например, натуральная септима (отношение 7:4) совершенно несовместима с 12-ступенным строем — а имеющиеся в нем варианты септимы (10-я и 11-я ступени) не могут достаточно гармонично сочетаться с мажорным или минорным трезвучием (проблема септаккорда). Иначе говоря, основа гармонии в 12-ступенном строе — трезвучие, а вертикаль из четырех звуков (септаккорд) противоречит

строению звукоряда. Тем не менее, септаккорды широко применяются в музыке.

Ладовая организация пентатоники и диатоники достаточно хорошо передается в 12-ступенном строе. Однако в музыке известны и другие лады, принципиально иные по своему строению и звучанию. Например, композиторы XIX и начала XX веков активно использовали так называемую целотонную гамму и гамму «тон–полутон» (Глинка, Лист, Римский-Корсаков и др.). Целотонная гамма — это последовательность звуков, отстоящих друг от друга на один тон: *до–ре–ми–фа#– соль#– ля#–си#–...* В 12-ступенном строе нота *си#* совпадает с *до<sup>1</sup>* — и гамма замыкается через 6 ступеней. Тем не менее, абсолютная симметричность этой гаммы весьма неудобна для интонационного слуха: интервалы *до–фа#* и *фа#–до<sup>1</sup>* (12-ступенный тритон, три целых тона) должны различаться, чтобы гамма приобрела интонационную устойчивость. Продолжая целотонную гамму далее, во вторую октаву, следовало бы писать *до–ре–ми– соль<sup>♭</sup>–ля<sup>♭</sup>–сib–до<sup>1</sup>*, предполагая, что *соль<sup>♭</sup>* лежит ниже *фа#* и т. п. Возникает понятие «неоктавности» звукоряда: хотя целотонная гамма имеет 6 ступеней на октаву, ее звукоряд не повторяет в каждой октаве одних и тех же ступеней, и не на каждой ступени можно построить интервал октавы. Иными словами, есть несколько вариантов одной и той же ступени звукоряда, каждый из которых употребляется в зависимости от художественных задач. Разумеется, в 12-ступенном строе передать такого рода оттенки совершенно невозможно.

Аналогичные особенности и у других «сконструированных» ладов современной музыки: гаммы «тон–полутон» (уменьшенный лад, *до–ре–ми<sup>♭</sup>–фа– соль<sup>♭</sup>–ля<sup>♭</sup>–ля–си–до<sup>1</sup>*), гаммы «полутон–тон» (*до–до#–ре#–ми–фа#– соль–ля–ля#–до<sup>1</sup>*), увеличенного лада (*до–до#–ми–фа– соль#–ля–до<sup>1</sup>*) и др. Разумеется, названия ступеней гамм здесь довольно условны — имеется несколько вариантов, которые отождествляются в 12-ступенном строе. Тем не менее, композиторы выбирают ту или иную запись, чтобы более точно передать интонацию. Теория музыки, опирающаяся на 12-ступенный звукоряд, отмечает это просто как разноречивость в нотации, прихоть автора. Лишь выход за пределы 12-ступенного звукоряда позволяет понять смысл таких «вольностей».

В музыке XX века известно огромное количество искусственно сконструированных необычных ладов. Как правило, исполнение в 12-ступенном строе сильно затрудняет выделение их из звучащей музыки

на слух. Поэтому композиторы вынуждены прибегать к разного рода техническим ухищрениям, чтобы сохранить индивидуальность интонации при использовании принципиально недиадонических ладов. Особенно ярко эти трудности проявляются для ладов, содержащих больше 7 ступеней — именно здесь начинает сказываться энгармонизм, отождествление разноименных звуков в темперированном строе. Например, восходящая хроматическая гамма до-мажор содержит 12 ступеней:

*до до# ре ре# ми фа фа# соль соль# ля ля# си до<sup>1</sup>.*

Имеется также восходящая хроматическая гамма до-минор:

*до до# ре ми<sup>б</sup> ми фа фа# соль ля<sup>б</sup> ля си<sup>б</sup> си до<sup>1</sup>,* —

и нисходящие хроматические гаммы до-мажор и до-минор:

*до<sup>1</sup> си си<sup>б</sup> ля ля<sup>б</sup> соль соль<sup>б</sup> фа ми ми<sup>б</sup> ре ре<sup>б</sup> до,*

*до<sup>1</sup> до<sup>б</sup> си<sup>б</sup> си<sup>бб</sup> ля<sup>б</sup> соль соль<sup>б</sup> фа фа<sup>б</sup> ми<sup>б</sup> ре ре<sup>б</sup> до.*

Все эти гаммы по звуковому составу совпадают в 12-ступенном строе, хотя исполнитель чувствует различие интонации, что и подчеркивается разной нотацией. В современной музыке уже прочно утвердились так называемые сериальные построения: композитор выбирает серию из достаточно большого числа звуков или интервалов — и в музыкальном произведении пытается выделить именно эти звуки и интервалы, показывая их в различных сочетаниях — например, повторяя серию в обратном порядке, откладывая интервал в противоположном направлении (инверсия) и т. д. При этом, как отмечал выдающийся композитор и теоретик музыки XX века А. Веберн, «ряд отнюдь не случаен и не произволен, он строится соответственно определенным соображениям...» Однако соображения эти до сих пор не обоснованы теоретически, и удачная серия в большинстве случаев рождалась «как случайная находка, являвшаяся в связи с неким интуитивным представлением о произведении в целом и потом тщательно обдумывавшаяся», как «вдохновение». Естественно, что все крупные музыканты так или иначе стремились найти объективные основания для поиска наиболее выразительных серий. Основатель додекафонии А. Шенберг писал: «...бесспорно, мы можем соединять двенадцать тонов один с другим, и эта возможность может вытекать лишь из уже существующих отношений между этими двенадцатью тонами». Он надеялся, что «через несколько десятилетий публика признает тональную природу той музыки, которая сегодня называется

атональной». Ясно, что в рамках 12-ступенного строя все его ступени относительно равноправны — и здесь вряд ли можно говорить о естественных связях и тяготениях.

Таким образом, развитие музыкального языка требует выхода за рамки 12-ступенного строя. Одно из направлений современной музыки — сонористика — провозгласило отказ от звукорядности как таковой. Сонорная техника оперирует не нотами, а звуковыми блоками, объединяемыми в ансамбли блоков и звуковые пласты. Широко используются в современной музыке разного рода кластеры — сочетания большого количества близко расположенных по высоте звуков. Тем не менее, как отмечают многие современные теоретики, основой сонорности «продолжают оставаться двенадцать тонов, управляемые различными методами» (Н. Гуляницкая). При значительном обогащении средств художественной выразительности в музыке, существенного изменения музыки как художественного мышления не произошло. Для такого изменения необходимо преобразование прежде всего того набора элементов, который лежит в основе музыкального языка — звукоряда. Так же как в речевом общении разные языки прежде всего характеризуются своими наборами звуков-фонем, и часто можно понять, на каком языке говорят, не зная самого языка, по одному лишь звучанию речи, — точно так же и музыкальные интонации (слова музыкального языка) складываются из отдельных нот звукоряда, который определяет характер звучания музыки в целом.

Попытки создания все новых звукорядов предпринимались как в самом процессе становления 12-ступенного строя, так и потом, когда этот строй стал общепризнанным. При этом привлекались самые различные соображения: от возврата к квинтовым последовательностям (но теперь уже с обязательной равномерной темперацией) — до современных теоретико-множественных построений (алгебра звуковысотных классов). В частности, многие теоретики обращали внимание на 19-ступенный звукоряд, обладающий весьма интересными свойствами, позволяющими ставить его наравне с 12-ступенным строем. Создавались также инструменты с различным числом клавиш на октаву и темперированной настройкой. Однако до сих пор эти попытки остаются в копилке музыкальных курьезов, не играя никакой роли в развитии звукорядности. Во многом этому способствует неразвитость теоретических представлений. Важно не просто предложить какой-то

звукоряд — но и описать его свойства, дать рекомендации по его применению в музыке, в соответствии с его природой и внутренним строением. В частности, теория должна указать правила построения ладов (систем мелодических тяготений) и правила гармонии (построения аккордов и следования их один за другим). Большинство современных теорий не в состоянии это сделать. Лишь недавно появилась достаточно общая теория звукорядности, позволяющая описывать строение и свойства возможных звукорядов. О ней речь пойдет в следующей главе.

#### **4. Звукоряды народной музыки**

Искусства, доставляющие нам ныне столько удовольствия, не принадлежат какому-либо одному изобретателю или даже какому-либо отдельному народу; над ними трудилось все человечество, они — плод общих усилий, результат продолжающих друг друга размышлений, в которых участвовали все люди, все народы и все времена.

*Ж. Л. д'Аламбер*

Установление равномерно-темперированной 12-ступенной шкалы значительно расширило творческие возможности европейских музыкантов, позволило им писать музыку в любых тональностях, с весьма сложной гармонией. Однако основа, на которой выросла классическая европейская музыка, осталась — это народный мелос, песенный фольклор, которые продолжают оказывать значительное влияние на развитие музыки. Весьма существенным становится также внедрение в европейскую музыку ряда неевропейских музыкальных систем, интерес к которым постоянно растет. В современном мире, когда бурно развиваются связи между людьми различных континентов и рас, мы все больше узнаем, что музыка разных народов столь же разнообразна, как их языки и обычаи. Некоторые народы издревле имеют весьма развитую музыкальную культуру. В соответствии с особенностями музыкального слуха и традициями, они интуитивно создали множество нетемперированных и темперированных строев. Так, в одной из школ

индийской музыки октава разделяется на 22 интервала, называемых «шрути». Между этими ступенями могут вставляться еще меньшие интервалы, доступные только первоклассным исполнителям. До сих пор интервалика индийской традиционной музыки слабо исследована, поскольку она строится на принципиально недиадонической основе и не укладывается в рамки обычной европейской теории музыки. Исключительным разнообразием отличается индонезийская музыка, особенно на островах Ява и Бали. Сложные 17- и 24-ступенные строи используются в музыке арабских стран. Так, 17-ступенный звукоряд «рехави» содержит ступени, близкие к

$$1 \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{8}{7} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{16}{13} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{11}{8} \quad \frac{16}{11} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{8}{5} \quad \frac{13}{8} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{7}{4} \quad \frac{16}{9} \quad \frac{15}{8} \quad 2$$

Известен древнерусский «звукоряд Шайдурова»

*до ре ми фа соль ля си<sup>б</sup> до<sup>1</sup>*

с «натуральной» септимой *си<sup>б</sup>* (7 : 4). Чистая септима присутствует также в полном диатоническом звукоряде армянской музыки и староанглийских мелодиях. В народной испанской музыке распространён 8-тоновый звукоряд

*до ре<sup>б</sup> ми<sup>б</sup> ми фа соль<sup>б</sup> ля<sup>б</sup> си<sup>б</sup> до<sup>1</sup>*

Отметим также 11-ступенный «цыганский» лад:

*Ля Си до до<sup>#</sup> ре ре<sup>#</sup> ми фа фа<sup>#</sup> соль соль<sup>#</sup> ля*

Разумеется, нотные обозначения при записи ладов народной музыки лишь приблизительно передают их звуковой состав.

Весьма распространены в музыке разных народов пентатонические звукоряды. В зависимости от характера централизации вокруг одной из ступеней, различают китайские, кельтские, венгерские, курпевские варианты пентатоники. Как правило, пентатоника в народной музыке появляется не в чистом виде, а с примесью интонаций семиступенного звукоряда. Особое место занимает здесь японская музыка, сочетающая в себе черты тетраходности, пентатоники и диатоники.

Типично для народной музыки образование так называемых модальных систем. Подобно тому, как в древнегреческой музыке семиступенные лады конструировались из тетраходов, возможно построение сложных звуковых систем путем накопления разных интонационных оборотов, вплоть до наложения разных пяти-, шести- и семиступенных звуковых последовательностей («модусов») — с указанием правил

перехода между ними. Подобное явление наблюдалось и в профессиональной музыке европейского средневековья (сольмизационная система) — однако особенно важен модальный принцип в восточной музыке (арабской, тюркской, индийской). Часто оказывается, что весьма сложные звукоряды традиционной музыки представляют собой лишь наложение нескольких простых (как правило пентатонических), так что обороты разных «модусов» не смешиваются в реальном исполнении.

Композиторы во все времена обращались к музыкальному фольклору для поиска ярких и выразительных интонаций. При этом характерные обороты народной музыки воспроизводятся (моделируются) при помощи существующих в профессиональной музыке выразительных средств. Однако нередки случаи, когда воспроизведение фольклорных интонаций невозможно в рамках 12-ступенного звукоряда — и необходим переход к другой звуковой основе. Как раньше развитие музыкальной практики потребовало равноправного использования всех тональностей, так и сейчас постепенно складывается потребность в свободном использовании различных звукорядов, в соединении их выразительных возможностей в пределах одного музыкального целого. Разумеется, такое использование невозможно без достаточно полного теоретического описания звукорядности. Теория должна дать музыкантам специальный язык, на котором можно было бы передать правила употребления и сочетания разных звукорядов в музыке.



# ВОСПРИЯТИЕ ВЫСОТЫ: К ТЕОРИИ ЗВУКОРЯДА

К иному синтезу, к иному обобщенью,  
Могучей думы воплощенью.

*Э. Верхарн*

## 1. Психология деятельности

Посредством глаза, но не глазом,  
На мир смотреть умеет разум...

*Уильям Блейк*

Человек есть целый мир представлений,  
погребенных в ночи «я».

*Г. В. Ф. Гегель*

Традиционная теория музыки обычно предполагает, что высотные закономерности в музыке проистекают из каких-то объективных свойств самих звуков, которые непосредственно отражаются человеком в процессе слушания музыки. Музыкальное ощущение есть результат контакта человека с действительностью, и достаточно изучить акустические свойства музыкальных звучаний и физиологию слухового аппарата, чтобы понять законы построения всех существующих музыкальных систем. Такая точка зрения возникла еще на заре развития музыкального искусства и получила законченную теоретическую форму в идеях Царлино и его последователей о происхождении музыкальных интервалов из обертонового ряда. В XIX веке, когда начала формироваться психология как самостоятельная наука, Г. Гельмгольц отмечал, что теория слуха должна включать физическую, физиологическую и психологическую части — описание свойств звуковых колебаний, ощущения звука и его восприятия. Однако, под влиянием многовековых предрассудков, Гельмгольц считал, что «именно физиологическая часть, и в частности — теория

слуховых ощущений — есть та область, в которой музыка должна искать основания своей структуры». Таким образом полностью игнорировалась субъективность музыкального восприятия, а законы музыки вместо того, чтобы развиваться по мере развития человека-музыканта и человека-слушателя, превращались в абсолютные и неизменные установления на все времена. Огромный авторитет Гельмгольца в научной среде, его многочисленные философские работы и блестящие экспериментальные исследования в области физики и физиологии слуха сделали физиологический подход к теории звуковысотности настолько распространенным, что даже сейчас, когда многочисленные данные указывают на несостоятельность этой точки зрения, мало кто среди теоретиков музыки способен преодолеть «обертоновый» стереотип.

Разумеется, интервалы между отдельными гармониками музыкального звука играют важную роль в восприятии музыки. Однако любой интервал можно представить отношением каких-нибудь гармоник (поскольку любое вещественное число можно сколь угодно точно представить рациональным числом) — и совершенно неясно, по какому принципу отбирать музыкальные интервалы. Фактически все построенные «из обертонового ряда» строи на самом деле предполагают, что звукоряд уже выбран из интуитивно-практических соображений, — и дальше его ступеням просто приписываются какие-то отношения целых чисел.

Сокрушительный удар по идее «натуральных» интервалов был нанесен выдающимся советским ученым Н. А. Гарбузовым. В работах 1928–1956 годов он экспериментально показал, что восприятие любых элементов музыкального языка (высоты звука, его длительности, темпа и ритма, тембра, динамических оттенков, интонаций) носит зонный характер, то есть любая физическая характеристика звука может изменяться в некоторых пределах без изменения воспринимаемого качества звучания. Для высоты звука имеется иерархия зон: в зависимости от способа восприятия, величины зон могут изменяться в несколько раз.

Но если все звуки в пределах зоны качественно одинаковы, представление их отношениями частот гармоник становится несущественным и неопределенным. Так, например, квинта может быть представлена и отношением  $3 : 2$ , и отношениями  $3001 : 2001$ ,  $301 : 201$  или  $149 : 99$ ... Все эти интервалы попадают в одну зону — и

неразличимы с музыкальной точки зрения. Таким образом, звукоряд должен представляться не как набор звуков определенной высоты — а как набор зон, каждая из которых представляет собой одну ступень звукоряда, то есть множество звуков, имеющих одинаковый звуковысотный смысл.

Важность зонных представлений в теории слуха видна даже на физиологическом уровне. Так, за счет низкой добротности мембраны, чистый тон может возбуждать до 36% волосковых клеток внутреннего уха! А ведь уже на входе слухового аппарата появляются звуки, весьма далекие от чистых тонов. Например, ширина тона (разброс частот) при хоровом или оркестровом исполнении музыки может превышать величину 12-ступенного полутона! Понятно, что выделение чистых тонов в таких условиях требует значительной внутренней работы, с участием всех мозговых систем.

Итак, для понимания природы звуковысотности в музыке нужно учитывать не только физиологию, но и психологию слуха. Фундаментом же любого психологического исследования может стать общая теория деятельности, сформулированная советским психологом А. Н. Леонтьевым.

Всякий человек в своей жизни вступает в большое количество разнообразных *деятельностей*, каждая из которых характеризуется своим *мотивом*. Отдельная деятельность представляет собой иерархию *действий*, каждое из которых направлено к своей *цели*. В свою очередь, действие есть последовательность *операций*, имеющих определенное *назначение*. Если какое-то действие участвует во многих *деятельностях*, оно может свернуться в операцию — и наоборот, операции могут развертываться в действия при возникновении нестандартных ситуаций. Точно так же действия превращаются в деятельности, приобретая индивидуальный смысл, — а деятельности становятся действиями, когда они подчинены деятельности более высокого уровня.

Внешние операции, действия и деятельности, благодаря постоянному общению людей, отражаются в их психике, превращаясь во внутренние операции, действия и деятельности. Этот процесс называется интериоризацией и приводит ко все большему обогащению внутреннего мира человека. Любое психическое явление представляет собой интериоризованную внешнюю деятельность. Часто оказывается возможным «заменить» какую-либо внешнюю деятельность внутрен-

ней, оставив на виду только ее результаты. Например, в поисках нужной формулировки для мысли человек может либо писать и исправлять на бумаге различные варианты, либо пробовать сказать так или иначе, либо проговаривать фразы «про себя», либо просто выдать «интуитивное» решение. Как правило, свертывание внешней деятельности сопровождается разворачиванием внутренней, и наоборот. Внешне простые действия или операции могут требовать сложной внутренней активности, которая просто не заметна со стороны.



**Рис. 7 — Цикл когнитивной деятельности**

На каждом уровне в когнитивной (познавательной) деятельности имеются три стадии: ощущение, восприятие и представление. Новое представление создает субъективные установки — и цикл повторяется заново, на более высоком уровне. Уровни восприятия в иерархической теории звукорядов обозначены слева.

Особую роль во взаимодействии человека с миром играют так называемые когнитивные (или познавательные) деятельности: ощущение, восприятие и представление. Ощущение — это процесс активного структурирования ситуации, то есть выделение в ней

«стандартных» форм, которые и называются представлениями. Поскольку у человека всегда в запасе огромное количество готовых представлений, его психика выделяет некоторый класс представлений, которые он считает наиболее возможными в данной ситуации, — и берет структуры только из этого класса, который называется сенсорной (т.е. относящейся к ощущению) установкой. Ощущение само по себе не создает новых представлений, оно лишь «кодирует» поток физических и психических раздражителей комбинациями «символов» из заданного набора.

Восприятие имеет дело уже не просто с внешними сигналами, а с субъективными представлениями о них, сформированными в процессе ощущения. Именно на уровне восприятия осуществляется логическая обработка ситуации, отнесение ее к определенному классу, а также оценка удовлетворительности ее описания в рамках текущей установки. Если ситуация не вписывается в установку, включается в работу представление, формирующее новый набор форм, более подходящий для взаимодействия с миром. Выглядит это как прогнозирование развития ситуации. Новая установка изменяет характер ощущения и восприятия — и все повторяется снова и снова (рис. 7). В этом циклическом прохождении уровней ощущения, восприятия и представления человек отражает внешний мир в субъективных образах.

Как и любые деятельности, ощущение, восприятие и представление могут быть внешними и внутренними, сворачиваться в действия и операции. Этим обуславливается огромное разнообразие форм восприятия, его субъективных особенностей. Для восприятия (как и для любого психического процесса) характерна иерархичность, то есть подвижная многоуровневость, развитие от простых форм к более сложным, изменение структур и перестройка систем. Как и в иерархии деятельностей, возможно свертывание восприятия в ощущение (при однородности ситуации), или развертывание в представление (на неожиданных поворотах).

Всякая внутренняя деятельность имеет эмоциональную окраску. Однако на разных уровнях возникают разные эмоции. Так, на сенсорном уровне эмоции неотделимы от самого ощущения и управляются непосредственно входными сигналами. Например, слитное звучание чистой квинты, плавность линии, «прозрачность» гармонии. На уровне восприятия возникают оценочные эмоции типа «нравится —

не нравится». Переживаются уже не сами ситуации, а их организованность, соответствие установкам и т. п. Перцептивные (т. е. относящиеся к восприятию) эмоции гораздо более индивидуальны, и одно и то же произведение искусства вызывает весьма различные чувства у разных людей, хотя сенсорные эмоции в целом похожи. Таким образом, на уровне восприятия начинается эстетическое переживание, и объяснение внутреннего строения музыки следует искать именно здесь.

Однако мы уже видели, что восприятие тесно связано с ощущением и представлением, — это уровни одной иерархии. Поэтому оказывается, что восприятие обусловлено, с одной стороны, способностью ощущения (то есть, в конечном итоге, физиологией), а с другой — способностью представления (то есть набором социально закрепленных форм деятельности). Понятно, что и законы восприятия, основываясь на биологических особенностях человека, будут меняться вместе с развитием человеческого общества. Тем не менее, существуют особые, универсальные формы деятельности, ее логика. И можно выделить универсальную основу восприятия высоты звука, абстрагируясь от бесчисленных индивидуальных особенностей, восстанавливая их впоследствии как отдельные проявления чего-то общего для всех людей.

## 2. Информация и диссонирование

Новая идея появляется в результате сравнения двух вещей, которые еще не сравнивали.

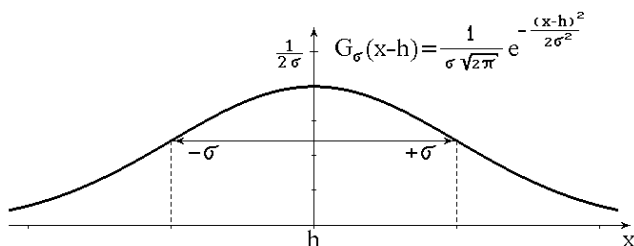
*К. Гельвеций*

Теперь имеет вес  
Лишь алгебры надежная твердыня.

*Э. Верхарн*

Предположим, что элементарное представление тона определенной высоты характеризуется, во-первых, его положением на шкале высот  $h$  (логарифм частоты), а во-вторых, степенью «расплывчатости» представления, дисперсией  $\sigma$ . Еще Гельмгольц предложил использовать для описания таких «размазанных» представлений широко

известное в математике распределение Гаусса (рис. 8). Значение этой функции в какой-либо точке  $x$  задает вероятность соответствующего отклонения от центрального значения  $h$  при определении высоты тона. Наиболее вероятно попадание в центр распределения, а по мере удаления от него вероятность быстро убывает. Это соответствует ранее описанной структуре тембра для музыкальных звуков (рис. 2б). Распределение Гаусса играет особую роль в математике, поскольку, согласно центральной предельной теореме, так ведет себя среднее значение от достаточно большого числа любых случайных величин.



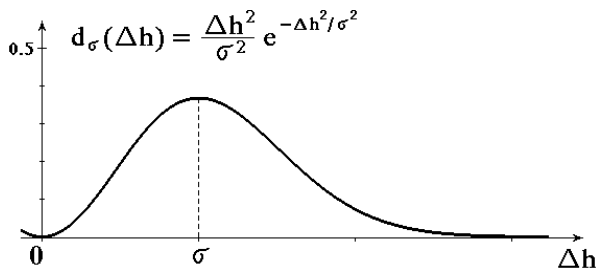
**Рис. 8** Распределение Гаусса.

Эта кривая описывает вероятность отклонения значения некоторой случайной величины от среднего значения. Чем больше отклонение, тем меньше его вероятность. С вероятностью 68,27 % значение случайной величины будет отличаться от среднего не более, чем на  $\pm\sigma$  — дисперсию распределения. Гауссоида описывает форму отдельной гармоники в субъективном тембре музыкального звука.

Теперь можно представить музыкальный звук набором его гармоник (тонов-гауссоид) и их амплитуд. Такое представление обычно в квантовой механике, где состояние квантовой системы описывается вектором, составленным из отдельных векторов-компонент. С другой стороны, это похоже на обычное задание тембра — и мы будем называть представление о музыкальном звуке внутренним (или субъективным) тембром. Разумеется, внутренний тембр не есть просто отражение спектра внешнего сигнала. Как уже отмечалось, представления — это своего рода шаблоны, под которые подгоняется внешний мир в процессе ощущения. Поэтому нельзя напрямую сравнивать субъективные тембры, скажем, с тембрами музыкальных инструментов, хотя некоторая взаимосвязь несомненно есть.

Сенсорная установка в такой модели — это просто некоторый субъективный тембр. Ему соответствует дисперсия  $\sigma$ , одинаковая для

всех «чистых» тонов. Ощущение представляет собой музыкальный звук готовым набором гармоник, подбирая лишь высоту основного тона. Именно в этой замене настоящего тембра на внутренний кроются причины независимости восприятия музыки от инструмента, на котором она исполняется. С другой стороны, появляется возможность воспринимать реальный тембр звука отдельно от звуковысотных свойств, как еще одну сторону музыки, еще одно выразительное средство и художественный прием.



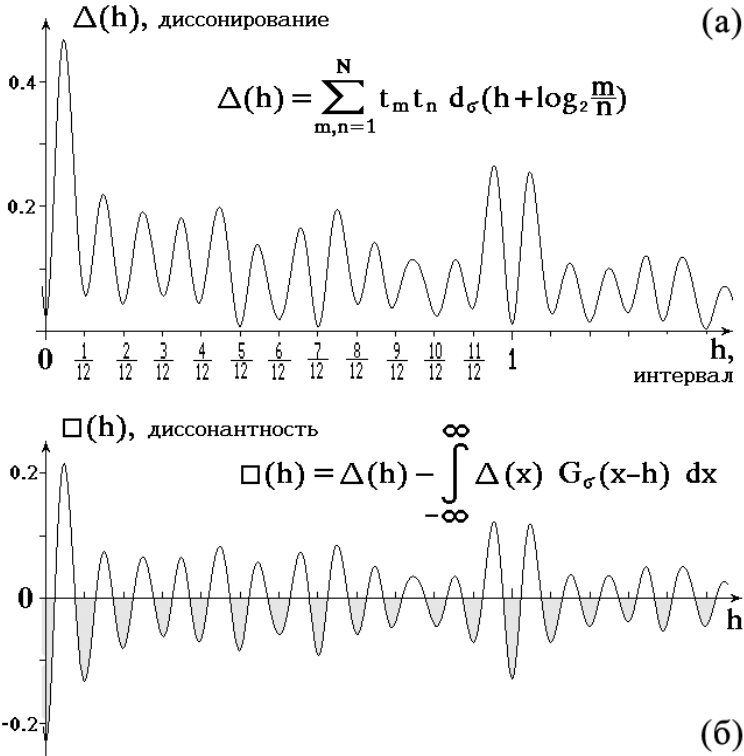
**Рис. 9 — Диссонирование изолированных гармоник**

Величина  $d_{\sigma}(\Delta h)$  определяет вероятность того, что два чистых тона, представляемых гауссоидами, с интервалом между ними (разностью высот)  $\Delta h$ , не будут объединены восприятием в одну общую структуру. Наиболее противоречат один другому тоны, отстоящие друг от друга на величину дисперсии  $\sigma$ . Очень близкие или слишком далекие тоны не диссонировуют:  $d_{\sigma}(\Delta h)$  для них мало.

Однако вернемся к звуковысотности. Как уже отмечалось, восприятие занимается сравнением различных представлений, оценкой их соответствия друг другу. Как же можно сравнивать музыкальные звуки? Очевидно, для этого они должны как-то взаимодействовать в восприятии. Если один чистый тон (гауссоида) появляется на фоне другого, они немного изменяют друг друга, что воспринимается просто как небольшой сдвиг — два тона как бы притягиваются один к другому. Но изменение некоторого распределения вероятностей всегда связано с привнесением в ситуацию определенного количества информации. Это количество можно вычислить для взаимодействия двух чистых тонов. Оказывается, что оно зависит лишь от разности их высот и дисперсии — соответствующая зависимость  $d_{\sigma}(h_1-h_2)$  изображена на рис. 9. Величина  $d_{\sigma}(h_1-h_2)$  называется *диссонированием* двух чистых тонов и показывает, насколько один из тонов «мешает»



восприятию другого. Вполне естественно, что при совпадении высот два тона совершенно не диссонируют. Точно так же, при очень большом различии высот тоны воспринимаются как не связанные друг с другом — и диссонирование тоже равно нулю.



**Рис. 10 — Диссонирование и диссонантность**

Два сложных (построенных из компонент-гауссоид с амплитудами  $t_n$  звука, интервал между основными тонами которых равен  $h$ , объединяются в общую звуковую структуру, если величина диссонирования  $\Delta(h)$  мала. Минимумы функции диссонирования (а) указывают положения звуков, которые совместимы в восприятии при данном внутреннем тембре и дисперсии, — звукоряд. Вычитание из  $\Delta(h)$  локально среднего уровня определяет звукоряд как набор зон: все звуки в окрестности какого-либо минимума, для которых диссонантность (б) отрицательна,  $\square(h) < 0$ , представляют одну и ту же ступень звукоряда. При построении графиков использованы значения  $t_n$  и  $\sigma$ , оптимальные для 12-ступенного строя.

Пользуясь обычными квантовомеханическими методами, можно теперь вычислить диссонирование — как матричный элемент оператора — для двух сложных музыкальных звуков, представленных одним и тем же субъективным тембром, но с разной высотой основного тона. Для этого достаточно взять величины  $d_{\sigma}$  для каждой пары гармоник — и просуммировать их, умножив на соответствующие амплитуды. Полученная величина  $\Delta$  зависит от разности высот основных тонов (то есть интервала  $h$  между звуками) и, конечно, от дисперсии  $\sigma$ . Функция  $\Delta(h)$  имеет вид кривой с несколькими минимумами (рис. 10а). Малость диссонирования означает, что соответствующие звуки наиболее подходят для объединения в одну звуковую систему — а значит, именно они образуют набор допустимых в музыке звуков, звукоряд.

Кривые диссонирования, типа изображенной на рис. 10а, были получены экспериментально еще в прошлом веке Г. Гельмгольцем — однако стремление свести музыку к физиологии слуха привело к тому, что эти замечательные результаты остались совершенно незамеченными и никак дальше не использовались. Конечно, сами по себе кривые диссонирования еще не дают возможности определить, какие именно звуки представляют ступени звукоряда. Мы уже знаем, что звукоряд должен быть представлен набором зон, внутри которых все звуки имеют один и тот же музыкальный смысл. Интуитивно ясно, что небольшое отклонение от минимума диссонирования не выводит за пределы зоны. Оказывается, что можно совершенно строго определить границы зон, если вычесть из функции диссонирования некоторый средний уровень. Тем, кто знаком с радиотехникой, известны схемы, выделяющие «переменную составляющую» сигнала. Типичны такие фильтры и для мозговых процессов, однако здесь обычно выделяются «пространственные» изменения, зоны возбуждения и торможения в коре мозга. Для функции диссонирования на рис. 10а можно построить функцию *диссонантности*  $\square(h)$ , рис. 10б, положительное значение которой указывает на невозможность включения соответствующего звука в звукоряд, а области отрицательных значений диссонантности (на рисунке они заштрихованы) дают звукорядные зоны. Таким образом, функция диссонантности полностью определяет звукоряд как набор зон.

### 3. Ритмы и тембры

Небесные тела парят на крыльях гармонии ритма; то, что мы называли центростремительной и центробежной силой, есть не что иное, как второе — ритм, первое — гармония. Музыка, поднявшаяся на тех же крыльях, парит в пространстве, чтобы соткать из прозрачного тела звуков и тонов слышимый универсум.

*Ф. Шеллинг*

Итак, мы умеем строить звукоряд, отвечающий некоторому субъективному тембру. Но остается вопрос: откуда берутся эти внутренние тембры? Каким-то образом их формирование должно быть связано с историей музыки, с музыкальной практикой. Можно предположить, что в процессе развития звуковысотного слуха в восприятии человека возникало огромное количество разных внутренних тембров, — однако в практике выжили только те из них, которые обладают особыми свойствами, делающими их предпочтительными по отношению ко всем другим возможностям. Есть два таких свойства — устойчивость и регулярность. Все человеческое познание представляет собой поиск устойчивого и регулярного в мире, стремление к нему свойственно и процессам восприятия.

Что же такое устойчивость? Как известно, человеческая психика обладает значительной нелинейностью, то есть внешний сигнал не просто отражается в психических процессах, но еще и активно преобразуется ими. Мы уже говорили о возникновении комбинационных частот как одном из проявлений нелинейности. Если в мозгу подвергается различным преобразованиям и внутренний тембр, то наиболее устойчивым тембром будет такой, который меньше всего изменяется при нелинейных искажениях. Можно оценить устойчивость величиной  $\tau$ , принимающей значения от нуля до единицы. Если  $\tau = 1$ , тембр абсолютно устойчив, то есть вообще не изменяется в нелинейных процессах. Можно показать, что для конечного числа гармоник достичь абсолютной устойчивости нельзя. Достаточно устойчивыми считаются тембры с  $\tau > 0.5$ . Неустойчивые тембры, с  $\tau$  близким к нулю, отсеиваются музыкальной практикой и не играют большой роли в восприятии высоты звука.

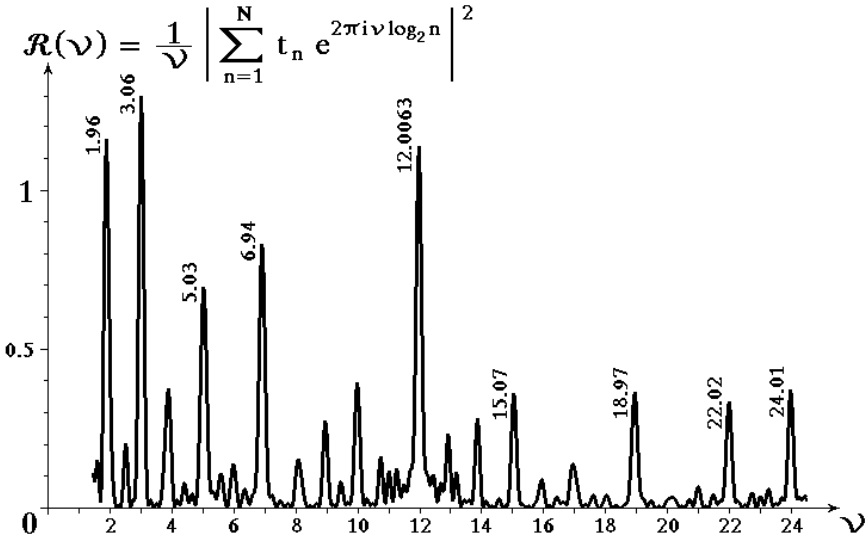
Регулярность — это свойство, родственное симметрии. Нужно, чтобы ступени звукоряда достаточно хорошо отделялись друг от друга, чтобы они качественно различались. Иначе говоря, если звукоряд содержит 12 ступеней на октаву, то сразу должно быть видно, что это именно 12 ступеней, а не 11 или 12 с половиной. Как найти наиболее регулярные тембры? Для этого используется математическая процедура выделения различных ритмов в изменении какой-либо величины — преобразование Фурье.

Мы уже показывали в первой главе, как смешение различных гармонических колебаний дает колебание довольно сложной формы. Изменение любой величины можно представить как сумму простых колебательных процессов — выделить в нем отдельные ритмы. Вообще говоря, этих ритмов очень много. Однако в случае с функцией диссонирования (рис. 10а) видно, что есть какой-то главный ритм, определяющий, насколько тесно расположены ступени звукоряда. А значит, можно считать наиболее регулярными такие тембры, для которых в функции диссонирования сильно выражен главный ритм, так что он явно выделяется из всех других ритмов. Поиск таких тембров — это задача, которая решается математическими средствами. При помощи компьютера можно найти все возможные оптимальные (то есть устойчивые и регулярные) тембры — и построить соответствующие звукоряды.

Конечно, сильный основной ритм не устраняет полностью все остальные ритмы в функции диссонирования. Некоторые из «побочных» ритмов оказываются при этом довольно сильными, гораздо более выраженными, чем другие. На рис. 11 показано, какие вклады дают разные ритмы в функцию диссонирования с рис. 10а. Видно, что, наряду с главным ритмом (12.0063 ступеней звукоряда на октаву), имеются также максимумы, соответствующие ритмам в 6.94, 5.03, 3.06 и 1.96 ступеней на октаву. Каждый из этих ритмов как бы выделяет часть ступеней основного звукоряда в особый звукоряд, «вложенный» в основной звукоряд, определяемый главным ритмом. Таким образом, оказывается, что в 12-ступенный звукоряд вкладываются подструктуры с 7-ю, 5-ю, 3-мя и 2-мя ступенями на октаву. Но мы уже знаем, что в 12-ступенном строе наиболее важными являются диатонические 7-ступенные лады, что в нем хорошо передается пентатоника, а основой гармонии служит трезвучие. Тем самым, понятна роль «побочных» ритмов в функции диссонирования:

они определяют возможные подструктуры, используемые в качестве лада или гармонии.

Восприятие может «обращать внимание» не только на главный ритм, но и на любое из возможных звукорядных вложений. Как пра-



**Рис. 11 — Функция регулярности для 12-ступенного строя**

Для каждого ритма — колебания с «частотой»  $\nu$ , содержащегося в функции диссонирования  $\Delta(h)$ , величина  $\mathcal{R}(\nu)$  показывает выраженность соответствующей звуковой структуры (с  $\nu$  ступенями на октаву) для звукоряда, заданного функцией диссонантности  $\square(h)$ . В строе с  $\nu = 12.0063$  наиболее важны подструктуры с числом ступеней на октаву 6.94, 5.03, 3.06 и 1.96. Более слабые пики указывают на другие звукоряды, совместимые с 12-ступенным строем.

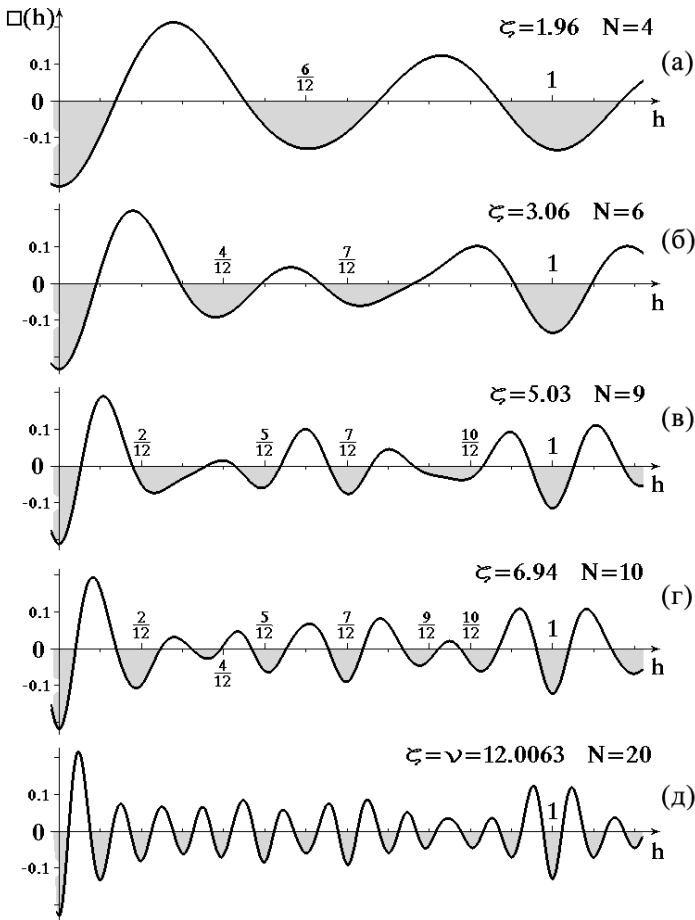
вило, в первую очередь воспринимаются именно вложения с небольшим числом ступеней, выделить которые можно, просто изменяя величину дисперсии: настройка на меньшее число ступеней требует увеличения дисперсии, а увеличение дисперсии приводит к отбрасыванию части высших гармоник в оптимальном тембре, соответствующем основному звукоряду. Для полученных «частичных» тембров можно обычным образом построить функции диссонантности, то есть определить звукорядные зоны. На рис. 12 показано строение 12-ступенного звукоряда — наборы зон для всех вложений. В полном соответствии с результатами Н. А. Гарбузова, на разных уровнях

восприятия зоны имеют разную ширину. Таким образом, восприятие звуковысотности в музыке оказывается иерархичным.

Очень важны в музыке понятия консонанса и диссонанса. В самом общем смысле, диссонанс — это выход за пределы некоторой структуры, противоречие с ней. Так как звукоряд представляет собой зонную структуру, естественно определить, что звук, не попадающий ни в одну зону, будет диссонансом *по отношению к данному звукоряду*. Для многоуровневого восприятия оказывается, что диссонантность на каждом уровне своя — и один и тот же звук может быть диссонансом на одном уровне, но вполне укладываться в зонную структуру на другом. Например, на рис. 12 десятая ступень звукоряда (которая конечно же «консонирует» на самом низком уровне) является диссонансом в гармонии (3-ступенное вложение), но не выходит за пределы диатонического или пентатонического ладов. Наиболее совершенными консонансами являются квинта и октава — они консонируют на всех уровнях.

Другое важное понятие музыки — тяготение. Конечно, сам по себе звук никуда не тяготеет. Только в определенном контексте начинает чувствоваться его большая субъективная близость к одному звуку, нежели к другому. Оказывается, что субъективные расстояния между звуками определяются функцией диссонирования, которая как бы задает метрику звукового пространства. Разумеется, на каждом уровне восприятия эта метрика своя.

Поскольку переключение восприятия с одного уровня на другой — это специальная внутренняя операция, вполне возможна ситуация, когда в качестве начала отсчета на разных уровнях будут использоваться разные ноты, то есть кривые диссонантности на рис. 12 могут сдвигаться одна относительно другой. Наиболее подвижны при этом более высокие уровни вложений (последовательность аккордов в одной тональности, ладовые модуляции при сохранении звукоряда). Таким образом, формируется сложный, многоуровневый контекст, в котором воспринимается и оценивается каждый звук. Эта звукорядная иерархия выступает теперь в качестве установки — вместо простой сенсорной установки, описанной ранее. Иначе говоря, звук наделяется уже не только субъективным тембром, но также набором его субъективных функций, то есть отношением к каждому уровню звукорядного контекста, системой диссонансов и тяготений.



**Рис. 12 — Иерархия звукоярдных вложений  
для 12-ступенного строя**

Каждая подструктура, так же как и основной звукоярд, задается набором зон, определяемых функцией диссонантности. Зоны более высоких уровней (а–г) шире зон самого низкого уровня (д) — и могут содержать несколько ступеней звукоярда. Вложение с числом ступеней на октаву  $\zeta = 6.94$  (г) описывает обычную диатонику, изображаемую средствами 12-ступенного строя, а вложения с  $\zeta = 5.05$  (в) и 3.06 (б) задают естественную для этого строя пентатонику и гармонию — трезвучие. Дуотоника  $\zeta = 1.96$  (а) может играть роль гармонии в пентатонических ладах.

#### 4. «Зоология» звукорядов

...в будущем композитор научится распоряжаться всеми тембрами, имеющимися в Природе, вместо тех, сравнительно немногих, которые мы можем сейчас извлекать из наших инструментов. Чтобы овладеть мастерством для использования всех этих возможностей, музыкант будущего должен будет изучить математические основы музыки, ясно указывающие на те элементы, которые смогут когда-нибудь создавать эти новые тембры...

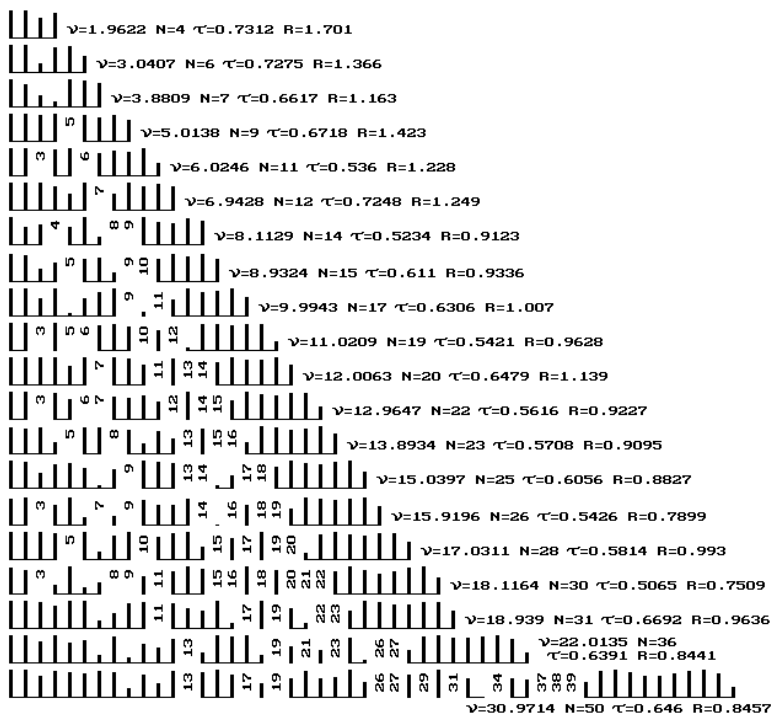
*Леопольд Стаковский*

Теория восприятия звуковысотности в музыке позволяет найти все возможные оптимальные внутренние тембры и описать иерархии соответствующих звукорядов. Оказывается, что возможных строев не так уж много. Прежде всего отметим, что устойчивые и регулярные тембры могут порождать только звукоряды с приблизительно целым числом ступеней на октаву; интервал октавы при этом обязательно попадает в одну из зон. Этот важный факт объясняет столь значительную роль октавы в музыке.

На рис. 13 показаны оптимальные тембры для звукорядов с относительно небольшим числом ступеней. Разумеется, детальное изучение какого-либо звукоряда требует построения иерархии вложений, исследования диссонансов и тяготений в разных контекстах — это большая и серьезная работа. Однако кое-что о свойствах звукоряда можно сказать сразу, по его внутреннему тембру. На рис. 13 заметно, что в оптимальных тембрах присутствуют не все гармоники — амплитуды некоторых из них равны, или почти равны, нулю. Весь тембр при этом делится на отрезки из гармоник с ненулевой амплитудой, разделенные «дырками». Такая картина сразу напоминает о формантных спектрах, характерных для речевых сигналов. Поэтому естественно назвать отрезки внутреннего тембра из нескольких гармоник формантами. Оказывается, размеры и расположение формант тесно связаны с художественными возможностями соответствующего строя. Действительно, если посмотреть на тембр для 12-ступенного звукоряда, вспоминаются утверждения Рамо о роли гармоник 1–6 и 8–10 в построении музыкальных интервалов. Интуиция музыканта подсказала



ему совершенно правильное положение первых двух формант. С развитием современной теории звуковысотности стало возможным математически строго показать, что седьмой гармоники действительно в спектре быть не должно. Таким образом, попытки сопоставить интервалы какого-либо звукоряда с интервалами обертонового ряда получают обоснование на более высоком уровне — и становится ясно, какие именно гармоники должны учитываться при таком сопоставлении. С другой стороны, оказывается, что способность выделения формант (тембровый слух) связана со способностью оценивать характер интонирования в том или ином строе.



**Рис. 13 — Оптимальные тембры**

Графически изображены амплитуды гармоник  $t_n$  в зависимости от  $n = 1 \dots N$ ; цифры указывают номера разделяющих форманты «дырок» (гармоник с нулевыми амплитудами). Приводятся числовые значения:  $\nu$  — число ступеней на октаву,  $\tau$  — устойчивость тембра и  $R(\nu)$  — регулярность строя.

Главные форманты в субъективном тембре — две низших, которые называются гармонической и ладовой. Первая, гармоническая форманта указывает на интервалы, из которых в данном строе можно составить благозвучные — по меркам этого строя — аккорды. Чем больше гармоник в гармонической форманте, тем богаче гармония в звукоряде. Видно, что, с переходом ко все более многоступенным строям, появляются все более длинные гармонические форманты. Иначе говоря, музыкальный слух развивается в направлении усложнения гармоний.

Можно классифицировать звукоряды по величине гармонической форманты. Так, самыми бедными в гармоническом смысле являются *аномальные* строи, у которых первая форманта содержит только две гармоники — так что лишь унисон и октава не диссонируют в аккордах. Таковы строи с 6-ю, 11, 13, 16 и 18 ступенями на октаву. Гармоническая форманта из четырех гармоник дает *квинтовые* звукоряды, у которых к гармонии подключается также квинта (и кварта); такие звукоряды все же достаточно бедны для современного музыкального мышления, хотя в одноголосной народной музыке разных стран они широко распространены. Это уже знакомые нам дуотоника и пентатоника, а также родственные пентатонике строи с 9-ю, 14 и 17 ступенями. Становление классической гармонии в XII–XIX веках было связано с освоением интервалов большой и малой терции, которые употребляются в гармонии *терцовых* звукорядов, с шестью гармониками в первой форманте. Наиболее яркие представители этого класса — семиступенная диатоника и 12-ступенный строй. Близок к терцовости также 15-ступенный звукоряд, у которого седьмая гармоника сильно подавлена. Наиболее же развитая гармония возможна в звукорядах *гармонического* типа, когда первая форманта содержит больше шести гармоник. Только в этих звукорядах свободно вписываются в аккорды септима и секунда (строи с 19-ю, 22-мя, 31-й ступенями на октаву).

Вторая важная форманта — ладовая — определяет, какие интервалы звукоряда могут использоваться как мелодические ходы (интервалы между гармониками внутри этой форманты) и как мелодические скачки (интервалы между ладовой и гармонической формантами). Все это характерные интервалы лада — отсюда и название форманты.

Соотношение размеров гармонической и ладовой формант — еще одна музыкальная характеристика звукоряда. Например, если господ-

ствуют гармонические интервалы, любой аккорд способен выполнять централизующую роль — и музыка теряет возможность более глобальной тональной организации. Такие строи называются *гармонически лабильными*; любой новый аккорд в них уводит музыку от прежнего центра, полностью меняет «точку опоры» для гармонического слуха. Наоборот, когда преобладают мелодические интервалы, теряется системность тяготений в мелодии, один лад может свободно сменять другой, ни одна нота не играет роль ладового центра, тоники. Такого рода *ладовая лабильность* используется в музыке для создания особого колорита, передачи настроения расслабленности, неустойчивости и т. п. Однако в целом гармоническая или ладовая лабильность ограничивают возможности применения звукоряда.

Наиболее универсальными являются *стабильные* строи, у которых оптимальный тембр достаточно уравновешен, и ни одна из формант не преобладает. Первый стабильный звукоряд — это обычный 12-ступенный строй. Уравновешенность тембра — его принципиальное отличие от всех предыдущих звукорядов, приводящее к равноправному развитию мелодики и гармонии, их взаимной поддержке, переплетению и взаимопроникновению. Предшественники его, пентатоника и диатоника, ладово лабильны, и в них музыка опирается в основном на мелодическое движение, с возникновением разного рода модальных систем. Однако диатоника была необходимым промежуточным звеном при переходе к 12-ступенному строю. В отличие от пентатоники, это терцовый строй, допускающий гармонию трезвучий, так же как и 12-ступенный звукоряд. В рамках диатоники возможно довольно развитое многоголосие, однако для полной стабилизации строя потребовалось противопоставить двум основным формантам еще одну форманту — хроматическую, объединяющую самые высокие гармоники.

Интервалы между гармониками хроматической форманты — это самые узкие интервалы в звукоряде; отношениями гармоник хроматической форманты к гармоникам других формант вводятся так называемые хроматические ступени, отличающиеся от нот лада на узкие интервалы (альтерация). Вообще, наличие хроматической форманты приводит к более четкой выраженности основного звукоряда. Каждый по опыту знает, что у некоторых певцов, при вполне правильном и музыкальном исполнении, совершенно не слышно текста, он теряется за мелодией. Та же самая вокальная партия у другого певца звучит вполне осмысленным текстом, и мы легко

воспринимаем как мелодию, так и слова. Происходит это благодаря особому тембру голоса, содержащему высокую «певческую форманту». Точно так же, хроматическая форманта в субъективных тембрах позволяет хорошо «проговаривать» звукоряд, четко отличать одну его ступень от другой.

Разумеется, для стабильности строя требуется определенное соотношение хроматической форманты с двумя главными. Хроматическая нестабильность проявляется либо в бедности хроматики, либо, наоборот, в легком разрушении музыкальных структур хроматическими ходами, либо в изменении ладовых функций при альтерации звука. Хроматически стабильны строи с 12-ю, 17, 19, 22-мя и 31-й ступенями.

Таким образом, мы видим, что переход от диатоники к 12-ступенному строю потребовал, помимо уравнивания мелодики и гармонии, основательного развития хроматики, подчинения ее ладовым и гармоническим структурам. Диатоника в этом смысле гораздо ближе к пентатонике, чем к 12-ступенному строю, и вполне естественно, что для становления 12-ступенного звукоряда потребовался значительный срок.

В музыкальной практике, конечно, встречаются все возможные звукоряды с числом ступеней, меньшим 12-ти. В музыке разных народов по-разному развивается звуковысотный слух, и на первый план выдвигаются не обязательно те же строи, что и в европейской традиции. Общими для всех ветвей развития музыки являются только дуотоника и пентатоника — пути дальнейшего усложнения музыкальных форм зависят от множества культурных и исторических условий. У многих народов сложились звукоряды с числом ступеней, большим двенадцати, — минуя универсальный 12-ступенный звукоряд. Однако гибкость и универсальность — необходимые свойства музыкального мышления, и в настоящее время 12-ступенная музыка (с моделированием в ней других звукорядов) распространилась по всему миру, вошла в культуру всех народов. Естественно попытаться выяснить: а нет ли других строев, которые могли бы стать столь же универсальными, как и 12-ступенный звукоряд? Оказывается, что достаточной стабильностью обладают лишь строи с 19-ю, 22-мя и 31-й ступенями на октаву. При числе ступеней, большем 31, тембры оказываются не очень устойчивыми; по-видимому, это предел для числа ступеней звукоряда.

## 5. 19-ступенный темперированный строй

И пускай за моим фо-но я и снег —  
Черно-белые клавиши ждут весны.  
И пускай не хватает красок в этом сне —  
Я еще не забыл цветные сны.

*М.Борзыкин*

Нам надо выучить новую музыку!  
Надо губами  
Новых звучаний слова ловить на лету...

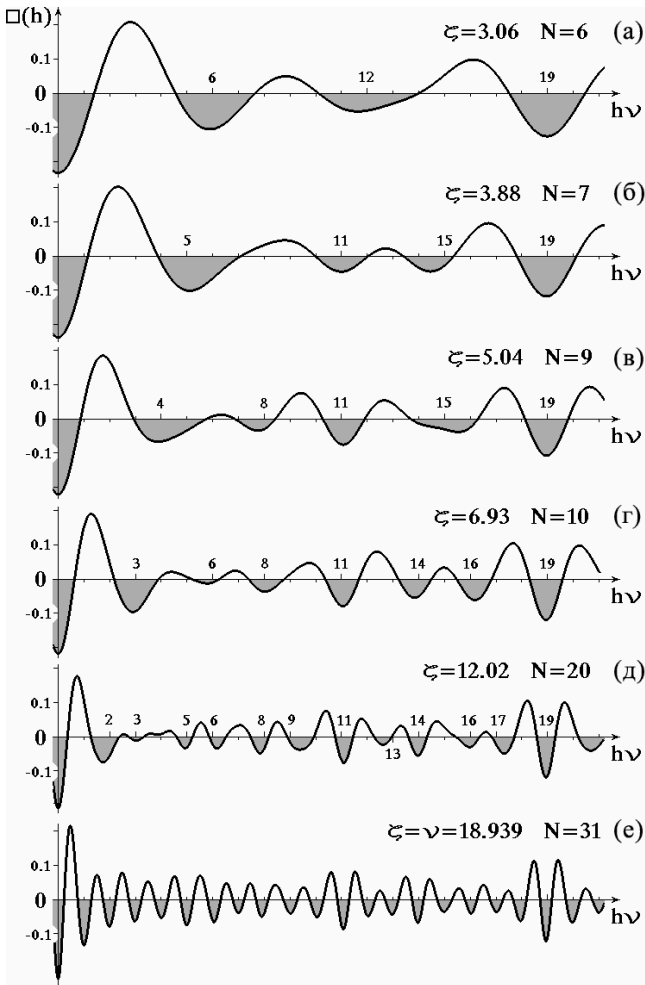
*Артур Лундквист*

Из трех кандидатов на роль универсального звукоряда лишь 19-ступенный строй обладает достаточно развитой иерархией вложений, удачно обобщающей возможности 12-ступенного строя (рис. 14). Наряду с уже имеющимися в 12-ступенном звукоряде 7-, 5- и 3-ступенными вложениями, здесь появляются подструктуры из четырех ступеней (септаккорды) и 12-ступенные подструктуры (гиперлады). Вполне естественно ожидать, что в 19-ступенном строе будет исполнимо все то же, что и в 12-ступенном, но появятся еще и какие-то новые возможности.

Оптимальный тембр для 19-ступенного звукоряда хорошо сбалансирован, устойчив; регулярность строя достаточно велика. Гармоническая форманта содержит 10 гармоник, то есть строй принадлежит к гармоническому типу и обладает весьма развитой аккордикой. Наличие седьмой и девятой гармоник в первой форманте указывает на возможность свободного использования септимы и большой секунды в гармонии. Ладовая форманта содержит гармоники с 12-й по 16-ю — поэтому интервал малой секунды (отношение 16 : 15) здесь будет обычным мелодическим интервалом, а не хроматическим ходом, как в 12-ступенном строе.

В соответствии со структурой тембра, можно сказать, что трех-, четырех- и пятиступенные вложения будут играть роль гармонии (они гармонически лабильны), а вложения с 7-ю и 12-ю ступенями — это возможные лады. Обычные названия нот можно сохранить и в 19-ступенном строе. Только размеры интервалов между ними будут здесь другими. Если в 12-ступенном звукоряде диатонический полутон *ми*—

*фа* был вдвое уже целого тона *до-ре*, то в новом строе диатонический целый тон — это интервал в три ступени звукоряда, а полутон — интервал в две ступени.



**Рис. 14 — Иерархия вложений для 19-ступенного строя**

Наряду с трезвучием (а), пентатоникой (в) и диатоникой (г), в 19-ступенном звукоряде (е) возможны естественные подструктуры из 4-х (б) и 12-ти звуков (д), отвечающие септаккорду и гиперладу. Вложения с 3-мя, 4 и 5-ю ступенями могут играть роль гармонии, а 7- и 12-ступенные вложения — ладовые.

Знаки альтерации в 19-ступенном строе имеют следующий смысл:

#	диез	повышение на 2 ступени (полутон)
♭	бемоль	понижение на 2 ступени
⦿	дубль-диез	повышение на 4 ступени (два полутона)
♭♭	дубль-бемоль	понижение на 4 ступени
♯	полудиез	повышение на 1 ступень
♭♯	полубемоль	понижение на 1 ступень
△	большой диез	повышение на 3 ступени (тон)
▽	большой бемоль	понижение на 3 ступени
‡	бекар	отмена альтерации

При этом имеется большое число энгармонически равных звуков:  $do\# = re\flat$ ,  $do\# = re\sharp$ ,  $do\Delta = re$ ,  $re\triangledown = do$  и т. д. Как и в 12-ступенном строе,  $mi\# = fa$  и  $si\# = do^1$ ; однако  $re\flat$  лежит ниже  $do\#$  — что хорошо соответствует мелодическому смыслу знаков альтерации, утерянному в 12-ступенном звукоряде. Ниже, в таблице, приведены величины и названия интервалов 19-тоновой шкалы, в сравнении с 12-ступенным строем и натуральными интервалами.

Обратим внимание на небольшое отличие интервала октавы от точной единицы. Такая «гармонизация» последнего «чистого» интервала вполне логично завершает тенденцию комметизировать их все, стремясь не к абстрактным целым отношениям, но к совершенству целого. В данном случае, высоты ступеней равны  $n/v$ , где значение  $v = 18.939$  (рис. 13) было выбрано из условия максимальной регулярности строя. Заметим, что при 12-ступенной темперации гармонизация октавы была бы не столь заметной из-за близости оптимального  $v = 12.0063$  к целому значению — и, возможно, именно поэтому до сих пор не произошла.

Любой из интервалов 19-ступенного строя может быть увеличен или уменьшен (на 2 ступени звукоряда), либо расширен или сужен (на 1 ступень). Так, размер уменьшенной большой терции равен 4-м ступеням звукоряда, а размер расширенной широкой сексты — 16-ти ступеням. Конечно, та или иная интерпретация интервала определяется художественной трактовкой соответствующего музыкального фрагмента и может приводить к отклонениям реального интонирования от темперированного 19-ступенного строя в пределах зоны.

<i>19 ступеней</i>		<i>12 ступеней</i>	<i>натур. строй</i>		
<i>до</i>	0	0.00000	0.00000	0.00000 <sub>1:1</sub>	прима (унисон)
<i>до#</i>	} 1	0.05280	0.08333	0.05889 <sub>25:24</sub>	узкая секунда
<i>ре♭</i>					
<i>до#</i>	} 2	0.10560	0.16667	0.09311 <sub>16:15</sub>	малая секунда
<i>ре♭</i>					
<i>ре</i>	3	0.15840	0.16667	0.16993 <sub>9:8</sub>	большая секунда
<i>ре#</i>	} 4	0.21120	0.25000	0.19267 <sub>8:7</sub>	широкая секунда
<i>ми♭</i>					
<i>ре#</i>	} 5	0.26401	0.33333	0.22239 <sub>7:6</sub>	узкая терция
<i>ми♭</i>					
<i>ми</i>	6	0.31681	0.41667	0.26303 <sub>6:5</sub>	малая терция
<i>ми#</i>	} 7	0.36961	0.41667	0.32193 <sub>5:4</sub>	большая терция
<i>фа♭</i>					
<i>фа</i>	8	0.42241	0.50000	0.36257 <sub>9:7</sub>	широкая терция
<i>фа#</i>	} 9	0.47521	0.58333	0.41504 <sub>4:3</sub>	кварта
<i>соль♭</i>					
<i>фа#</i>	} 10	0.52801	0.66667	0.48543 <sub>7:5</sub>	малый тритон
<i>соль♭</i>					
<i>соль</i>	11	0.58081	0.75000	0.51457 <sub>10:7</sub>	большой тритон
<i>соль#</i>	} 12	0.63361	0.83333	0.58496 <sub>3:2</sub>	квинта
<i>ля♭</i>					
<i>соль♭</i>	} 13	0.68641	0.91667	0.63743 <sub>14:9</sub>	узкая секста
<i>ля♭</i>					
<i>ля</i>	14	0.73922	1.00000	0.67807 <sub>8:5</sub>	малая секста
<i>ля#</i>	} 15	0.79202	0.83333	0.73697 <sub>5:3</sub>	большая секста
<i>силь</i>					
<i>ля#</i>	} 16	0.84482	0.91667	0.77761 <sub>12:7</sub>	широкая секста
<i>силь</i>					
<i>си</i>	17	0.89762	1.00000	0.80735 <sub>7:4</sub>	узкая септима
<i>си#</i>	} 18	0.95042	0.91667	0.84800 <sub>9:5</sub>	малая септима
<i>до<sup>1</sup>♭</i>					
<i>до<sup>1</sup></i>	19	1.00000	1.00000	0.90689 <sub>15:8</sub>	большая септима
					широкая септима
				1.00000 <sub>2:1</sub>	октава

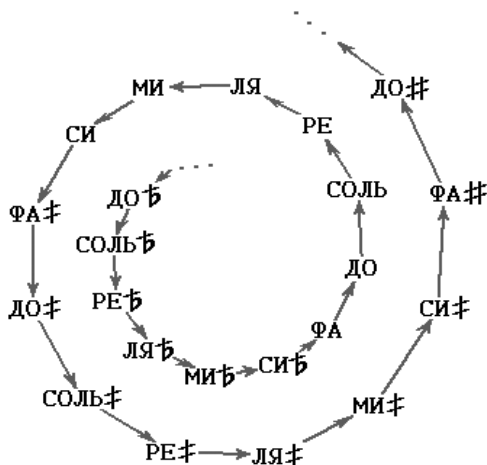


Поскольку 19-ступенный строй принадлежит к гармоническому типу, большинство интервалов в нем хорошо звучит в аккордах. Лишь малая и узкая секунды, большая и широкая септима и узкая секста (1, 2, 17, 18 и 12 ступеней звукоряда) являются исключительно мелодическими, причем узкая секунда и широкая септима — характерные интервалы гиперхроматики.

В то время как унисон и октава остаются совершенными консонансами, 19-ступенная квинта, которая существенно уже натуральной и 12-ступенной, звучит очень мягко и насыщенно и может свободно использоваться в полифонии. «Несовершенные консонансы» — квинта, кварта, малые и большие терции и сексты — обладают мягким и гармоничным звучанием. Они практически равноправны, хотя квинта все-таки наиболее приятна для слуха, а малая секста, может быть, чуть менее гармонична. Интервал узкой септимы близок к натуральной септимере (7-я гармоника обертонового ряда), которая совершенно не вписывается в 12-ступенный звукоряд. Таким образом, в 19-ступенном строе возможны два вида септаккордов: либо обычные созвучия из четырех звуков, расположенных по терциям, — либо трезвучия с узкой септимой, которые обладают невоспроизводимым в 12-ступенной музыке своеобразием, так как объединяют три качественно различных натуральных интервала: квинту, терцию и септиму. Заметим, что большая терция в 19-ступенном строе гораздо ближе к натуральной, чем в 12-ступенном звукоряде. А практически идеальное воспроизведение натуральной малой терции (отношение  $6 : 5$ ) в 19-ступенном строе полностью уравнивает ее с большой терцией — и тем самым естественно объединяет мажор и минор.

Классическое музыкальное мышление, привыкшее опираться на «чистую» квинту, с трудом принимает мысль о возможности изменения ее размера — и качества звучания. Однако в современной эстрадной музыке исполнители нередко прибегают к «гармоническим», 19-ступенным квинтам, придающим мелодии характерные немного «щемящие» интонации (от сочетания 19-ступенного и 12-ступенного интонирования). Принципиальное отличие «гармонической» квинты от натуральной (и 12-ступенной) — отсутствие смены регистра при исполнении голосом. Поэтому 19-ступенную квинту гораздо легче спеть нетренированному человеку, а правильное исполнение 12-ступенных квинт требует специальной постановки голоса. Конечно, кристальность классического бельканто имеет неоспоримые худо-

жественные достоинства и непременно сохранит свое место в музыкальном искусстве. Однако и мягкие, сдержанные, близкие к разговорным интонации тональной 19-ступенной музыки имеют все права на широчайшее признание.

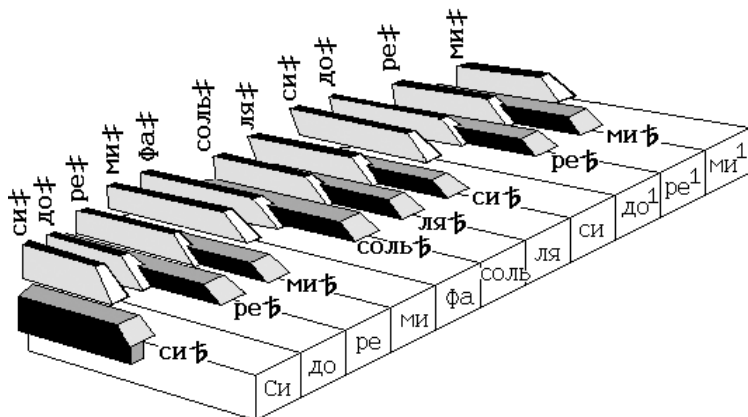


**Рис. 15 — Квинтовый круг 19-ступенного строя**

Движение по стрелке — откладывание «гармонической» квинты вверх (или кварты вниз). Вместо обыкновенных диезов и бемолей возникают половинные. В остальном квинтовый круг не отличается от обычного, только теперь энгармонически равные звуки возникают через каждые 19 шагов.

Наподобие того, как в традиционной теории музыки строился квинтовый круг по натуральным квинтам, можно построить последовательность «гармонических» квинт (которая, естественно, через каждые 19 шагов дает энгармонически равные звуки). Рис. 15 отличается от рис. 6 возникновением полудиезов и полубемолей вместо обычных диезов и бемолей. Действительно, шестая квинта вверх от *до* приводит к интервалу  $6 \cdot 11 = 66 = 19 \cdot 3 + 9$  шагов, то есть к девятой ступени звукоряда, *фа#*. Точно так же, вторая квинта от *до* вниз дает интервал  $-2 \cdot 11 = -22 = -19 \cdot 2 + 16$ , то есть 16-ую ступень звукоряда, *сиб*. Поскольку в тональной музыке движение по квинтовому кругу связано с переходом от одной тональности к другой (с добавлением «ключевых знаков»), можно сразу сообразить, что в 19-ступенном

строе «половинные» знаки альтерации говорят об изменении гармонических функций созвучий, а обычные диезы и бемоли указывают на изменение ладовых функций. Нотная запись становится гораздо более осмысленной, точнее передает авторский замысел.



**Рис. 16 — Клавиатура 19-ступенного фортепиано**

Обычная клавиатура содержит только белые и черные клавиши. 19-ступенное фортепиано имеет дополнительный ряд красных клавиш, так что, вместо каждой черной, между белыми клавишами теперь *две* промежуточных ступени в случае диатонического тона (до–ре и т. п.) — а диатонический полутон (си–до, ми–фа) делится красной клавишей пополам. При равномерно темперированной настройке все интервалы между ближайшими ступенями одинаковы. На белых и красных клавишах по отдельности исполняются диатонические гаммы, а черные клавиши образуют пентатонику. Подобно диатоническим ладам, можно строить 12-ступенные *гиперлады* различной структуры.

Клавиатура фортепиано для игры в 19-ступенном строе должна быть дополнена семью клавишами, которые следует отличить цветом (например, красным) от старых (белых и черных — конечно, настраиваемых по-новому). На рис. 16 показано, что эти клавиши должны быть немного выше черных, для удобства исполнения. Как и у обычного фортепиано, на белых клавишах исполняется гамма до-мажор, черные образуют пентатонический звукоряд, а вместе белые и черные клавиши дают восходящую хроматическую гамму до-мажор:

до	до♯	ре	ре♯	ми	фа	фа♯	соль	соль♯	ля	ля♯	си	до <sup>1</sup>
0	2	3	5	6	8	10	11	13	14	16	17	19

Красные клавиши дают диатонический  $do\sharp$ -мажор, а вместе с черными они образуют нисходящую хроматическую гамму  $do\sharp$ -мажор. В 19-ступенном строе различаются четыре хроматических гаммы, которые при 12-ступенном исполнении совпадают: восходящая мажорная, восходящая минорная, нисходящая мажорная и нисходящая минорная. Все это — различные возможные вложения 12-ступенного звукоряда в 19-ступенный (гиперлады). Кроме этого имеется так называемое «естественное» вложение (рис. 14д), соответствующее известной в музыке системе мажоро-минора. Естественное вложение звучит наиболее нейтрально из всех гиперладов, близки к нему по степени нейтральности восходящая мажорная и нисходящая минорная гаммы. Напротив, восходящая минорная и нисходящая мажорная гаммы звучат достаточно остро и обладают большей централизованностью.

Разумеется, в 19-ступенном строе много других гиперладов. Некоторые из них не содержат диатоники от основного тона — и поэтому могут стать опорой для музыки, принципиально отличной от 12-ступенной. Интересен в этом отношении гиперлад

<i>до</i>	<i>ре♭</i>	<i>ре♯</i>	<i>ми♭</i>	<i>ми♯</i>	<i>фа</i>	<i>фа♯</i>	<i>соль</i>	<i>ля♭</i>	<i>ля♯</i>	<i>си♭</i>	<i>си♯</i>	<i>до<sup>1</sup></i>
0	2	4	5	7	8	10	11	13	15	16	18	19

Узкие секунды *ре♯–ми♭*, *ми♯–фа*, *фа♯–соль*, *ля♯–си♭* и *си♯–до<sup>1</sup>* равномерно распределены по звукоряду гиперлада, так что он оказывается крепко сцементирован системой сильных тяготений и легко «ложится на слух». Узкий вводный тон *си♯–до<sup>1</sup>* (с сильным тяготением в *до<sup>1</sup>*) закрепляет за нотой *до* роль главного устоя — тоники. Гармония в этом гиперладе опирается не на трезвучие, а на аккорды из пяти звуков. Выделенные жирным шрифтом ступени образуют так называемое малое пятизвучие, играющее роль тонического аккорда в этом гиперладе. Интервальное строение малого пятизвучия (последовательность интервалов между соседними нотами): 4, 3, 4, 4, 4. Эта структура принципиально отлична от «мажорной» пентатоники, расположимой по неальтерированным квинтам: 3, 3, 5, 3, 5. Кроме малых и пентатонических пятизвучий, в гиперладе есть также большие пятизвучия, со структурой 4, 3, 5, 3, 4. От малого пятизвучия они отличаются повышением на одну ступень четвертого звука пятизвучия. Это напоминает различие минорного и мажорного трезвучий в обычной

тональной музыке. Не принадлежащие тоническому пятизвучию ступени образуют диатонический звукоряд — однако он представлен в одном из самых нейтральных своих расположений (рис. 14г) и не выделяется слухом в качестве опоры.

Гармонические структуры 19-ступенной музыки не столь жестки, и в рамках этого же гиперлада возможна, в принципе, вариация тоники с переносом опоры с *ми#* на *фа*. При этом тоническое пятизвучие (со структурой 4, 4, 3, 4, 4) будет реализовать естественное пятиступенное вложение (рис. 14в), а побочные аккорды будут либо аналогичны естественной пентатонике в 12-ступенном строе: 3, 5, 3, 5, 3 (рис. 12в) — либо будут иметь структуру 3, 4, 4, 3, 5. Все эти варианты ложатся в зоны рис. 14в, то есть будут консонировать.

В рамках гиперлада возможны также интонационно устойчивые подструктуры, аналогичные тетраордам древнегреческой музыки, особенно энгармоническому тетраорду. В пределах таких структур можно по принципу масштабного подобия строить, в частности, сжатые «миниатюрные» аналоги диатонических интонаций в уменьшенных по сравнению с октавой диапазонах.

Таким образом, предвидение А. Шенберга о существовании 12-звучных структур, аналогичных ладам и тональностям классической теории музыки, полностью оправдывается в 19-ступенном строе, в котором могут стать гораздо более логичными и выразительными сериальные конструкции современных композиторов. Огромный художественный потенциал этого строя пока совершенно не освоен музыкантами — а что может быть увлекательнее открывания новых миров?

В качестве примера моделирования в 19-ступенном строе других звукорядов, обратимся к целотонной гамме, о которой уже шла речь в связи с ограничениями 12-ступенного строя. Последовательность целых тонов (больших секунд) в 19-ступенном звукоряде оказывается принципиально неоктавной:

<i>до</i>	<i>ре</i>	<i>ми</i>	<i>фа#</i>	<i>соль#</i>	<i>ля#</i>	<i>си#</i>	<i>до#</i>	<i>ре#</i>	<i>ми#</i>	...
0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	

Это соответствует духу некоторых практических применений целотонной гаммы; последовательность с такими свойствами невоспро-

изводима на 12-ступенном звукоряде. Другая возможность — моделирование собственно 6-ступенного строя в 19-ступенном. Здесь есть два варианта: *до-ре-ми-фа#- соль#-ля#-си#* (= *до*<sup>1</sup>) — и *до-ре-ми- соль#-ля#-си#-до*<sup>1</sup>. А это и есть уже отмечавшиеся две формы записи целотонной гаммы, совпадающие в 12-ступенном строе. Различие между ними в 19-ступенном строе сходно с различием между мажором и минором, а несимметричность структуры обоих вариантов позволяет более надежно фиксировать слухом целотонную гамму как специфический лад.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ПЕРСПЕКТИВЫ МУЗЫКИ

Нет такого искусства или науки, которые не имели бы своего особенного языка, и именно изучение этого языка делает нас в зрелом возрасте неспособными к изучению новой науки.

*К. Гельвеций*

Во сне земного бытия  
Звучит, скрываясь в каждом шуме,  
Таинственный и тихий звук,  
Лишь чуткому доступный слуху.

*Ф. Шлегель*

Вот и подошла к концу наша краткая экскурсия по миру музыкальных звуков. Мы видели, как в истории музыки появлялись различные звуковые системы, как они отражались в сознании людей в разные времена. А время нынешнее — это прежде всего переход к новым музыкальным формам, имеющим свою звуковую основу, не похожую на то, к чему мы все давно привыкли и, может быть, несколько странную для обычного музыкального слуха. Современные технические средства дали композитору почти неограниченную власть над звуком: активный синтез тембров, компьютерная обработка интонаций, создание звуковых полей в большом объеме, соединение звука со светом и движением пространственных форм... И, конечно же, говорить о новой музыке можно лишь создав новый язык, далеко выходящий за рамки элементарной теории музыки. Так, переход к свободному использованию различных звукорядов требует от музыканта знаний о формантной структуре субъективных тембров, об иерархиях звукорядных вложений и способах их обращения, о расположении и размерах звукорядных зон на разных уровнях. Конечно, нельзя сразу освоиться среди такого количества необычных представлений. Однако и музыканту раннего средневековья показалась

бы крайне сложной классическая теория гармонии! «У каждой эпохи свой язык и свои средства выражения», — говорил известный музыкант, талантливый композитор и выдающийся теоретик XX века Борис Асафьев. Развивать свой художественный язык и способы его описания (то есть самопознания) — жизненная необходимость искусства.

До сих пор музыка в основном была привязана к звукоряду. С появлением сонористики начала развиваться новая ветвь искусства — звукопись. Так, в живописи, есть строгая графика, рисунок — а есть сложная техника цветовых оттенков, видимых впечатлений. Но точно так же, как в живописи любая композиция опирается на соотношение линий, форм и объемов, — так и музыке всегда будет требоваться опора на правильную интонацию. В сфере звуковысотности это прежде всего — звукоряды. Можно сколько угодно привлекать бытовые и синтезированные шумы, усложнять ритмы, играть тембрами и силой звука, фазовыми эффектами и контрастами звуковых пластов — но как только звуки начинают различаться по высоте, в игру вступают законы звуковысотного восприятия, и с необходимостью возникает звукоряд. Поэтому изучение свойств возможных звукорядов, построение новых ладовых и гармонических систем, модельных интонаций — все это обязательно для полноценного развития музыки.

Разумеется, потребуется еще большая работа, чтобы научиться на современном уровне говорить о сторонах музыки, отличных от звуковысотности. Понятия, относящиеся к ритму, к динамическим оттенкам и штрихам очень слабо развиты в нынешней теории музыки. Совершенно нет описания пространственно распределенной музыки и тембровой динамики. Даже в сфере звуковысотности пока много неясного с описанием звуковых пластов, агрегатов и кластеров. Повидимому, здесь потребуются изменения в самой системе записи музыки. До сих пор нет устоявшихся способов нотации сонорных эффектов. Однако выработка соответствующих понятий и приемов их фиксации неизбежна. В этом суть всякого, и в том числе музыкального, мышления: из хаоса первоначальных, синкретичных (нерасчлененных) представлений выделяются отчетливые понятия; понятия объединяются (синтезируются) в категории, которые становятся основой



сознательного творчества и фундаментом для интуитивного поиска новых образов и идей.

Всемирно известный дирижер Леопольд Стаковский писал: «Понимание внутренней природы музыки — органического единства и сложного, но безупречного порядка ее математических основ — нисколько не уменьшит нашего эмоционального восприятия красоты и поэзии музыки». Мы можем лишь добавить, что именно изучение внутреннего строения музыки, богатства ее выразительных средств и творческих возможностей приводит к обогащению нашего восприятия, к развитию эстетического переживания и умения слышать и понимать музыку жизни, которую каждый из нас постоянно носит в себе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л. В. Авдеев, П. Б. Иванов. Математическая модель восприятия звукорядов. Препринт ОИЯИ, Р5-90-4, Дубна, 1990.
2. Б. В. Асафьев. Музыкальная форма как процесс. Л.: «Музыка», 1971.
3. ВОСПРИЯТИЕ: Механизмы и модели (ред. Н. Ю. Алексеенко). М.: «Мир», 1974.
4. Б. М. Галеев. Человек, Искусство, Техника (Проблема синестезии в искусстве). Казань: Издательство Казанского университета, 1987.
5. Н. А. Гарбузов — музыкант, исследователь, педагог. М.: «Музыка», 1972.
6. С. А. Гельфанд. СЛУХ: Введение в психологическую и физиологическую акустику. М.: «Медицина», 1984.
7. Р. Х. Зарипов. Машинный поиск вариантов при моделировании творческого процесса. М.: «Наука», 1983.
8. Л. А. Кузнецов. Акустика музыкальных инструментов. Справочник. М.: Легпромбытиздат, 1989.
9. А. Н. Леонтьев. Избранные психологические произведения в двух томах. М.: «Педагогика», 1983.
10. Т. Ливанова. История западноевропейской музыки до 1789 года. т. 1, М.: «Музыка», 1983; т. 2, М.: «Музыка», 1982.
11. Е. В. Назайкинский. О психологии музыкального восприятия. М.: «Музыка», 1972.
12. Н. Переверзев. Проблемы музыкального интонирования. М.: «Музыка», 1966.
13. L. V. Avdeev and P. B. Ivanov. “A mathematical Model of Scale Perception”, *Journal of Moscow Physical Society*, v. 3, pp. 331–353 (1993).
14. P. B. Ivanov. “A Hierarchical Theory of Scale Perception: Musical Scales”, *Leonardo*, v. 27, no. 5, pp. 417–421 (1994).
15. P. B. Ivanov. “A Hierarchical Theory of Scale Perception: Scales in the Visual Arts”, *Leonardo Music Journal*, v. 5, pp. 49–55 (1995).

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
МИР ЗВУКОВ .....	7
1. Звук в природе и в музыке .....	7
2. Мир слуха .....	12
3. Музыкальный слух .....	17
ОЩУЩЕНИЕ ВЫСОТЫ ЗВУКА: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СТРОИ .....	21
1. Истоки музыки .....	21
2. Колебания струны и натуральный звукоряд .....	24
3. Звукоряд Древней Греции .....	29
4. Пифагоров строй .....	33
5. Другие математические строи .....	37
РАВНОМЕРНО ТЕМПЕРИРОВАННЫЙ СТРОЙ .....	41
1. Становление 12-ступенного строя .....	41
2. Строение звукоряда .....	45
3. Поиски других возможностей .....	48
4. Звукоряды народной музыки .....	54
ВОСПРИЯТИЕ ВЫСОТЫ: К ТЕОРИИ ЗВУКОРЯДА .....	57
1. Психология деятельности .....	57
2. Информация и диссонирование .....	62
3. Ритмы и тембры .....	67
4. «Зоология» звукорядов .....	72
5. 19-ступенный темперированный строй .....	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ПЕРСПЕКТИВЫ МУЗЫКИ .....	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	90

**Издание выпущено  
в рамках проекта «Книга по требованию»**

Авдеев Леонид Викторович  
Варивода Юлия Ильинична  
Дубовик Владимир Михайлович  
Иванов Павел Борисович

**РОЖДЕНИЕ ЗВУКОРЯДА: Из Чего Делают Музыку**

Редактирование: П. Б. Иванов  
Менеджер проекта: Е. А. Молочникова  
Оформление: П. Б. Иванов  
Компьютерная верстка: П. Б. Иванов

Подписано в печать 16.10.2006. Заказ № 4970.  
Формат 70×90/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. листов 1,8. Тираж 100 экз.

Издательство «BODlib»  
197342, Санкт-Петербург, ул. Белоостровская, д. 22

[info@bodlib.ru](mailto:info@bodlib.ru)  
[www.bodlib.ru](http://www.bodlib.ru)

Отпечатано в типографии «Printissa»  
197342, Санкт-Петербург, ул. Белоостровская, д. 22

[www.printissa.ru](http://www.printissa.ru)