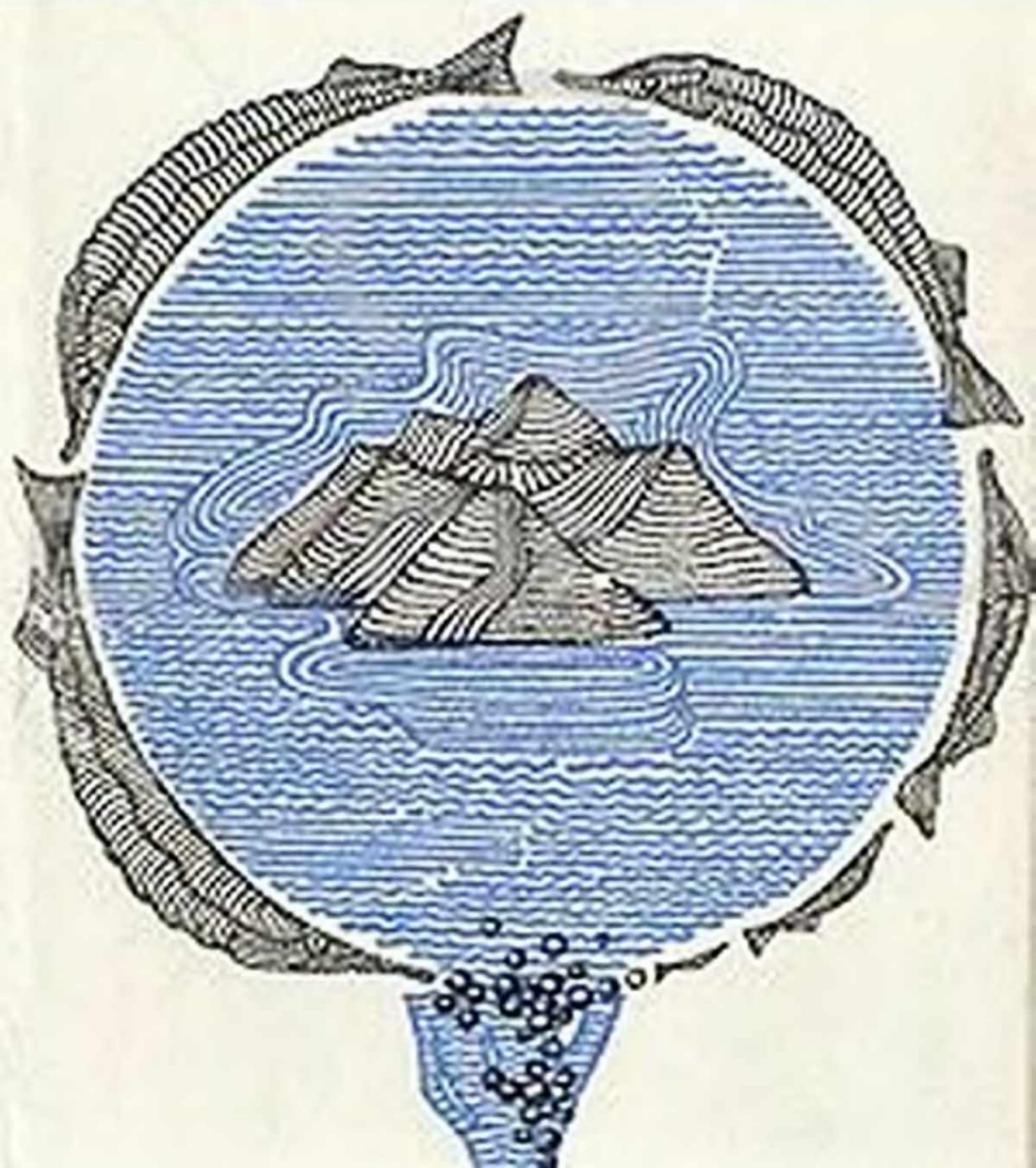
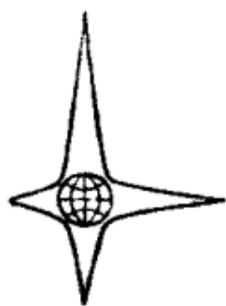


Р. Х. РАЙТ

НАУКА О ЗАПАХАХ

В
МИРЕ
НАУКИ
И
ТЕХНИКИ





ИЗДАТЕЛЬСТВО
«М И Р»

The Science of Smell

by R. H. Wright

LONDON 1964

Р. Х. Райт

НАУКА О ЗАПАХАХ

Перевод с английского Л. Г. Булавина и Т. А. Никольской

Под редакцией и с предисловием проф. Н. П. Наумова

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» · МОСКВА 1966

„Наука о запахах“ Р. Райта — научно-популярная книга о восприятии запахов как одном из важнейших средств ориентации животных в окружающем их мире, одном из основных и, по общему признанию, наименее изученных „чувств“.

В книге интересно рассказывается о значении запахов при поисках пищи, о роли обоняния в поведении рыб, в частности в далеких миграциях тихоокеанских лососевых, которые проходят тысячи километров и легко находят дорогу из океана в „родные“ реки; раскрываются механизм восприятия запахов и влияние их на поведение животных.

Автор убедительно показывает, как решение на современном уровне биологических проблем увязывается с комплексом методов математики, физики, химии и других наук.

Книга изобилует фактическим материалом. Рассчитанная на широкий круг читателей, она не перегружена специальной научной терминологией. Сложные вопросы изложены в ней просто, доступно. Книга Р. Райта представит несомненный интерес и для тех, кого волнуют проблемы биокибернетики и бионики.

649172



*Редакция научно-фантастической
и научно-популярной литературы*

Предисловие

Книга Р. Х. Райта с ее образным и многообещающим названием — «Наука о запахах» — не совсем обычна и интересна со многих точек зрения.

Это великолепное исследование посвящено проблеме обоняния и запахов, проблеме, которую И. П. Павлов считал одной из наиболее сложных и трудных в физиологии и общей биологии.

Автор не только дал довольно полную сводку известных фактов и мнений, но и внес существенный вклад в разрешение самой проблемы. Исследования Р. Райта глубоки по постановке вопросов и технически находятся на вполне современном уровне.

Свои идеи Райт излагает конкретно и детально, избегая неопределенных и общих выражений. Вместе с тем он со скрупулезной придирчивостью отмечает их преемственную зависимость от работ предшественников и связь с мыслями, ранее высказанными другими исследователями. Подобная манера изложения производит на читателя особо благоприятное впечатление, тем более что это обязательное для научной литературы правило, к сожалению, не всегда и не всеми соблюдается с необходимой тщательностью.

Помимо высокого качества и ценности как специального исследования, книга Р. Райта имеет и значительно более общий интерес, так как представляет хороший пример разработки биологической проблемы, проведенной на вполне современном научном уровне. Здесь и использование современной техники и методов наблюдений для получения точных фактов, раскрывающих по возможности полно характер исследуемого явления; и осмысливание фактического материала с помощью идей, имеющих хо-

дение не только в биологии, но и в смежных естественных науках, особенно в математике, физике и химии; и трактовка явления с самых широких позиций, в том числе и философских, позволяющих выяснить его общий смысл и значение, а также исторические корни и пути развития.

Данные, приведенные исследователем из научной литературы и полученные непосредственно им самим, касаются очень широкого круга явлений, связанных с тем, что мы называем запахами и обонянием. Получены они большей частью с помощью современной техники, принятой в биологии, химии и физике, включая и так называемое «тяжелое научное оборудование» типа инфракрасной спектроскопии.

Собранные факты обработаны и интерпретированы с применением современного математического аппарата, что позволило объективно оценить их значение и прийти к широкому общему выводу.

Все это было бы невозможно сделать без широкого использования принципа содружества наук, под знаменем которого современное естествознание совершает свое победное шествие, достигая невиданных до сих пор скоростей развития и осязательно становясь реальной основой все ускоряющегося технического прогресса во всех отраслях производства. Книга Райта может служить хорошим примером современного комплексного исследования. Изучая ее, читатель наглядно убеждается, что может дать широкое содружество естественных наук, обменивающихся не только техническими достижениями (хотя и это имеет огромное значение!) и методическими подходами и приемами, но также своими принципами и общими идеями. Именно этим достигается глубина постановки проблемы, раскрытие основных сторон явления и его наиболее существенных связей.

Райт пишет, что мысли и идеи, изложенные в его книге, могли возникнуть только как синтез классических идей

и приемов биологии и химии, идей квантовой механики, методов инфракрасной спектроскопии и теории информации. Речь идет, разумеется, не о механическом соединении этих различных элементов биологии, химии, физики и математики, а о их творческом использовании, позволяющем раскрыть самые разные стороны сложной проблемы восприятия запахов и увидеть в обонянии одно из важнейших средств ориентации животных в пространстве и общения между организмами (в том числе между животными и растениями). Нужно сказать, что Р. Райт делает это мастерски.

Необычность и привлекательность книги о запахах заключается и в том, что автор очень образно демонстрирует в ней свой творческий метод. Он не только и даже не столько излагает результаты исследований и итоги осмысливания добытых фактов, сколько стремится показать тот путь, который привел его к научным заключениям и идеям. С большим удовольствием читатель воспринимает ту трезвую критику, которую автор высказывает по адресу собственных заключений, считая эти вполне отвечающие современному уровню и техническим возможностям выводы лишь приближением к научной истине.

Книгу прочтет с удовольствием не только специалист, но и каждый образованный человек, потому что она посвящена широкому и интересному вопросу и написана не шаблонным, сухим «научным» языком, а языком человека, влюбленного в свою проблему, со страстью обсуждающего ее спорные стороны и стремящегося показать объективность своих взглядов.

Монография Р. Райта, одна из лучших в своей области, посвящена не только важной научной теме, но и злободневному практическому вопросу, остро интересующему работников сельского хозяйства и медиков, промысловых ихтиологов и охотоведов, деятелей охраны природы и многих других. Все они хотели бы управлять поведением диких животных — вредителей сельского и лесного

хозяйства, хранителей и распространителей болезней человека и домашних животных, объектов охоты или промысла. Одним из наиболее мощных и, кстати сказать, наиболее применяемых средств такого управления служит использование биологически значимых запахов— привлекающих (апеллентов) или отпугивающих (репеллентов). Однако малое их распространение и невысокая эффективность прямо связаны с недостаточной изученностью обоняния и запахов как биологического явления. Сейчас этим вопросам уделяется большое внимание. Надо надеяться, что перевод книги Р. Райта поможет развитию подобных исследований и у нас в стране. В настоящее время, когда неумеренное увлечение химическими средствами борьбы начинает приносить свои скверные плоды, особенно необходимо обратить внимание на разработку таких средств, которые не приводили бы к широкому отравлению почв, растений и животных, что угрожает здоровью людей, не вызывали бы появления ядоустойчивых форм вредителей и не сказывались бы разрушительно на живой природе. В этой ситуации проблема использования отпугивающих и привлекающих запахов еще ждет своего разрешения.

Н. П. НАУМОВ

От автора

Этот обзор посвящен обонянию и реакциям на запахи. Автор хотел бы, чтобы его понимали как специалисты в различных областях науки, так и просто любители. В книге затронуты вопросы миграций рыб, инфракрасной спектроскопии, физиологии нервной деятельности, органической химии, психофизики, теории информации, поведения животных и квантовой механики.

Немногие ученые знакомы со всеми этими вопросами одновременно. Поэтому у автора было две возможности. Первая — использовать точный язык научной терминологии для каждой из затронутых специальностей, предоставив читателю самому разбираться в предложениях типа: «В передаче обонятельных сигналов принимают участие следующие отделы мозга: обонятельная луковица, обонятельный тракт, участки базальных ядер переднего мозга, включая предгрушевидный и параамигдалоидный комплексы, и некоторые части полосатого тела».

Вторая — использовать, насколько это возможно, обычный литературный язык, учитывая, что это общий язык всех образованных людей и ученых независимо от специальности. Именно это я и попытался сделать. Однако провести сколько-нибудь четкую границу между языком образованного человека и научной терминологией очень трудно. У специалистов, которые найдут полезными мои экскурсии в незнакомые им области, я вынужден просить снисхождения, когда дело дойдет до их специальностей. А неспециалисты, я надеюсь, просто заинтересуются этой книгой.

Ванкувер, май 1963

«Наука захватывает нас только тогда, когда, заинтересовавшись жизнью великих исследователей, мы начинаем следить за историей развития их открытий».

ДЖ. К. МАКСВЕЛЛ

Как работает ученый

Мне хотелось бы рассказать о захватывающе интересной и важной, не раскрытой до сих пор тайне запаха — не только потому, что она надолго задержала мое внимание, но и потому, что это одна из тех областей научного исследования, которыми более всего пренебрегали.

Кроме того, я попытаюсь в какой-то мере показать технику научного поиска, который ведется и на лабораторном столе, и в специальной литературе, и в умах ученых, являющихся такой же неотъемлемой частью аппарата науки, как стеклянная посуда или электронное оборудование лаборатории.

Природа явления, называемого Наукой, настолько важна и многим неизвестна или известна в искаженном виде, что вторая моя цель может в конечном счете оказаться наиболее важной. Если бы эта книга была всего лишь отчетом, фиксирующим состояние наших знаний о запахе и обонянии, скажем, на 17 часов такого-то дня, она вскоре потеряла бы свое значение. Однако она, помимо этого, показывает науку «в работе», и поэтому не особенно важно, что она неизбежно устареет в техническом отношении.

Я сам занимался проблемами запаха и обоняния, и стиль изложения, следовательно, будет небеспристрастным. Это вполне естественно, однако техника научного исследования такова, что систематически сводит на нет неизбежную тенденциозность любого исследователя, допуская в науку только объективно достоверные данные. Это свойство организованной науки и дает ей огромную силу, помогающую изменять мир.

В научных писаниях принято говорить о себе в третьем лице, вроде: «В предыдущем сообщении (Райт, 1956) автор показал, что...» — и так далее. Это хорошо, когда внимание стремятся сфокусировать не на авторе, а на работе, однако здесь я не стану придерживаться такой несколько высокопарной интонации. Иногда я буду называть себя «я», а не скрываться за безликим третьим лицом еще и для

того, чтобы показать, что научное исследование в сильнейшей степени зависит от личной активности.

Науки неизбежно связаны между собой. Свойственная им взаимозависимость следует из того факта, что наука имеет дело не со всем научным опытом человека, а только с той его частью, которая воспринимается более чем одним наблюдателем. Существуют огромные области личного, главным образом эмоционального, опыта, которые остаются вне поля зрения науки, потому что их нельзя воспроизвести и объективно проверить. Если упускают из виду коллективность науки (как это часто бывает), возникает «слепое пятно». Это случилось, например, когда в высшей степени уважаемый математик заключил свою статью следующими словами:

«Любопытно, но я не припоминаю, чтобы когда-либо слышал последовательное рассуждение какого-нибудь автора, который, исходя из философских или теологических предпосылок, по-видимому встречающих всеобщее признание, пришел к выводу, что назначение жизни состоит в том, чтобы посвятить ее математике».

Но если наука — коллективное предприятие, то такое, в котором принимают участие индивидуумы. Поэтому все связанное с ней необходимо рассматривать с двух точек зрения.

Прежде всего — о целях изучения. Это общая цель Науки в ее развитии, и это личные цели каждого ученого в отдельности, и они никоим образом не одни и те же. Личные мотивы столь же различны, как и сами ученые, но они обычно содержат в разных пропорциях умственную любознательность и стремление к познанию, усиленные притягательным свойством научной работы — единственной в своем роде комбинации физических и умственных сил. В противоположность этим разнообразным частным мотивам существует общественный, который заставляет Общество в целом поддерживать Науку в целом. Он достаточно прост: это окупается.

Тот же дуализм проявляется и в научном методе. Научному методу дают разные определения, и в большинстве случаев весьма неудовлетворительные. Можно прочесть о сопутствующей вариации или индуктивно-дедуктивном методе, но широкому читателю это ничего не говорит об истинном существе науки, так сказать о ее духе. Путаные определения возникают, если не различать индивидуаль-

ного и коллективного аспектов; это недопустимо, ибо индивидуальное и коллективное научное творчество принадлежит к самым удивительным деяниям индивидуума и общества.

Много раз пытались прославить науку как личное дерзание, однако я думаю, что лучше всего — и единственным словом — это сделал Майкл Фарадей в рукописи научного дневника, который он вел. Фарадей был одним из двух или трех наиболее самобытных ученых прошлого столетия и одним из десяти наиболее мощных интеллектов, которые когда-либо видел мир. Он верил в единство Природы — в то, что все явления природы можно свести к единой системе идей, — и посвятил свою жизнь поискам экспериментального обоснования этой мысли. 13 сентября 1845 года он записал следующий отчет об опыте, проведенном с целью выяснить, существует ли связь между светом и магнетизмом:

«13 сентября 1845 г. Эксперимент проводился с куском тяжелого стекла из силикобората свинца размером $5 \times 4,5 \times 1,25$ сантиметра, две меньшие грани которого были отполированы. Ни в том случае, когда одноименные или разноименные полюсы магнита находились на противоположных сторонах (по отношению к ходу поляризованного луча), ни в том случае, когда одноименные полюсы располагались по одну сторону, никакого эффекта не было обнаружено ни с переменным, ни с постоянным током...»

И тут, после описания всех этих отрицательных результатов, мы внезапно видим коротенькое слово, состоящее из двух букв, написанное огромными заглавными печатными буквами и трижды подчеркнутое, — «НО»: «...НО, когда по одну сторону располагались разноименные полюсы магнита, магнитное поле действовало на поляризованный луч, и таким образом было доказано, что магнитная сила и свет взаимосвязаны. Этот факт окажется, вероятнее всего, исключительно плодотворным...» И так далее.

Те, кто видят это «НО», написанное посередине страницы огромными печатными буквами и подчеркнутое, не могут представить себе Фарадея бесстрастным, хладнокровным наблюдателем, как его часто характеризуют в учебниках.

Каждый ученый рано или поздно находит свою собственную формулу жизни. Фарадей, например, построил

свою формулу жизни на общем принципе. Он сказал: «Я долгое время придерживался мнения, граничащего с убежденностью, что различные формы, в которых проявляются силы материи, имеют общий источник, или, другими словами, они столь непосредственно связаны и взаимозависимы, что могут взаимопревращаться и обладают эквивалентами мощности своего действия».

Он посвятил себя поиску и открытию объективного доказательства этих взаимопревращений. В то же время он был достаточно проницателен, чтобы видеть коллективную сторону того, чем занимался. Он писал: «Я больше хотел находить новые факты и соотношения... чем подкреплять уже найденное, будучи уверен, что оно получит полное развитие в дальнейшем».

Кекуле следовал иному принципу. «Давайте учиться мечтать,— говорил он,— и тогда, может быть, мы откроем истину. Воздержимся от обнародования наших мечтаний, пока они не будут проверены трезвым суждением».

История и результаты его мечтаний об углеродных цепях и бензольном кольце известны каждому ученому.

Эйнштейн руководствовался другой формулой. «Высшая цель физика,— сказал он,— состоит в том, чтобы прийти к таким универсальным элементарным законам, при которых космос может быть построен чистой дедукцией. К этим законам нет логического пути; только интуиция, основанная на проникновении в смысл опыта, может привести к ним».

Все эти умы — в высшей степени индивидуального склада — объединяет способность к исключительному творческому воображению при обдумывании результатов эксперимента.

Как делается наука

Если научный метод сам по себе довольно гибок, то в коллективном смысле он представляется гораздо более жестким и формальным. Он состоит из системы, с помощью которой можно наиболее эффективно организовать процесс познания. На этом вопросе стоит остановиться подробнее.

В основе всего мы имеем данные, представляющие в сжатом виде зарегистрированные наблюдения проверяемых явлений, которыми может быть какой-либо предмет, или событие, или комбинация их. Явления мы воспринимаем с помощью наших органов чувств. Органы чувств — это механизмы, однотипно устроенные у всех нормальных человеческих существ и, следовательно, передающие в мозг сходные впечатления. Это делает Вселенную примерно одинаковой для всех нормальных людей, и наука сама по себе касается только тех сторон мира, которые действительно подобны в этом смысле.

При тщательном изучении явления все наблюдения записываются; эти записи называются данными. Данные можно получить путем, как мы называем, «чистых наблюдений», когда факторы, действующие на наблюдаемое явление, не поддаются контролю исследователя, или путем «экспериментальных наблюдений» («экспериментов»), во время которых действительно контролируются по крайней мере некоторые из таких факторов. История показывает, что если чистые наблюдения заменить экспериментальными, то процесс исследования обычно заметно ускоряется. Когда этого сделать нельзя, то, как мы вскоре увидим, трудность можно преодолеть с помощью теории.

Всякое наблюдение выполняется так тщательно и беспристрастно, как это позволяют обстоятельства, и, поскольку наука коллективна, записывается и в письменной форме сообщается другим ученым. Следовательно, мысли в конечном итоге переводятся в фразы. Точности описания и сообщения можно достигнуть при ясном понимании значения каждого использованного слова. Если мы имеем дело со все большим количеством явлений, изучаемых все

более детально, возникает потребность в новых словах для записи наших наблюдений. Это объясняет и необходимость точной научной терминологии. (Но здесь можно потерять чувство меры. Лично я особенно ненавижу глагол, связанный со словом «гипотеза», который чаще всего означает не более чем «предполагать» и употребляется исключительно для наукообразия. Иногда чересчур научные термины приводят к прямому искажению смысла, если они взяты из совершенно другой области, — употребляющие их люди демонстрируют тем самым свое невежество.)

Тщательность и беспристрастность при сборе и регистрации данных и независимая проверка их разными исследователями являются краеугольным камнем науки. Чтобы быть уверенным, надо сомневаться. Дарвин сказал, что Природа, если бы только могла, солгала бы.

Иногда говорят, что наука имеет дело с фактами. Правильность этого утверждения зависит от значения, придаваемого слову «факт». Для большинства людей «факт» — это «истина». Достаточно очень небольшой практики в постановке опытов или составлении предложений, чтобы убедиться, что каждое измерение обязательно связано с некоторой ошибкой, а любая фраза является только некоторым приближением к мысли пишущего. Поэтому лучше сказать, что наука имеет дело с данными, то есть с записанными наблюдениями, и что эти данные почти наверняка не истина, а только наилучшее из возможных приближений к ней.

После того как научные данные собраны, рассортированы, упорядочены, классифицированы, проверены, рассмотрены и продуманы, могут обнаружиться некоторые закономерности, то есть появится возможность связать один ряд наблюдений с другим или сопоставить проявление какого-то типа поведения с действием определенного ряда влияний. Такая связь может быть в дальнейшем сформулирована в виде обобщения, или «закона природы». Утверждение, что при определенных обстоятельствах всегда можно наблюдать определенные явления, неточно. Многие законы являются статистическими в том смысле, что они приложимы с достаточной степенью точности только к большим группам явлений, а при применении их к небольшим группам и отдельным явлениям отражают лишь вероятность какого-то события. Всякий закон свя-

зывает лишь наблюдаемые явления; он не выражает прямой связи между причиной и следствием. «Владельцы роллс-ройсов не умирают от туберкулеза». Это заявление может служить примером вполне обоснованного обобщения, однако оно не имеет ничего общего с причиной заболевания туберкулезом или результатом покупки дорогой автомашины.

Цель обобщения состоит в том, чтобы сделать возможным перенесение результатов наблюдения с одного случая на другой. Этот перенос вначале, естественно, сопровождается некоторой неопределенностью, и поэтому самая широкая проверка каждого обобщения в эксперименте и наблюдениях составляет существенную часть научного метода. Некоторые считают недопустимым для исследователя при обобщении выходить за пределы своих данных. В действительности, наоборот, недопустимо не выходить за их пределы, потому что это кратчайший путь к установлению границ, в которых справедливо данное обобщение. Немногие законы справедливы всегда и везде, поэтому знать, где законы выполняются, так же важно, как и знать, где они теряют свою силу.

Хотя и верно, что обобщения формулируются на основании данных, однако очень часто они могут быть предугаданы исследователем еще до получения подтверждающих данных. Это вполне законно, и ученый не роняет своего престижа исследователя, пока его предположения не противоречат совокупности его данных. Предположения, используемые в качестве проводника при выполнении наблюдений и постановке экспериментов, называют рабочей гипотезой. Последующие главы покажут, что рабочие гипотезы, когда они правильно используются, являются наиболее полезными орудиями науки. Научная интуиция — это, по существу, высоко развитая способность создавать рабочие гипотезы.

После того как мы установили ряд обобщений, следующий шаг состоит в том, чтобы связать их в теорию. Для этого надо сделать определенные допущения и показать с их помощью, что один ряд обобщений логически выводится из другого, кажущегося с ним не связанным.

Например, на основании наблюдений мы имеем ряд обобщений, известных как законы движения, которые описывают поведение движущихся тел. Кроме того, мы предполагаем другой группой обобщений, полученных иными

методами, которые описывают поведение газов и носят название газовых законов. Предположив, что газы состоят из малых, свободно движущихся, упругих частиц, мы можем показать, что газовые законы представляют собой логическое следствие законов движения (только при данном предположении о их строении). В этом заключена огромная концентрация знаний, так как в единую систему понятий, включающую, кроме того, и многие другие виды движения, связываются движение небесных тел и свойства газов. Это важное достижение, но это только один из результатов теории.

Рассматривая другие следствия из наших рассуждений, мы сможем предсказать и новые обобщения, например связь между плотностью газа и скоростью, с которой он будет выходить через маленькое отверстие.

Если такие предсказания окажутся правильными, то теория, совершенно очевидно, ускоряет приобретение новых знаний, показывая нам, где искать новые обобщения. Таким образом, накопление данных все меньше напоминает коллекционирование фактов и все более становится систематическим поиском нужной информации. Именно классификация и обобщение, и прежде всего теория, делают науку организованным познанием.

Теперь мы можем дать более ясные определения слов «теория» и «гипотеза» и установить различие между ними. Гипотеза есть более или менее вероятное предположение, применяемое для построения теории. (Она, конечно, отличается от рабочей гипотезы, определение которой уже дано.) Теория — это процесс, который связывает всю совокупность знаний, данных, обобщений и предположений на основе логического рассуждения. Большинство учебников не проводит четкого различия между словами «теория» и «гипотеза» и оставляет неясное ощущение, что гипотеза — это плохо обоснованная теория, а теория — это гипотеза, не так уж плохо обоснованная.

Весьма важно, что число предположений, используемых в построении теории, должно оставаться наименьшим. Этот принцип называют иногда Оккамовой бритвой, по имени средневекового философа, предложившего его. Когда появляются новые обобщения, не укладывающиеся в рамки старых теорий, или кто-то находит способ уменьшить количество допущений, необходимых для построения теории, старые теории заменяются новыми.

Очевидно, что логика является важной частью всякой теории. Она состоит из набора общепринятых правил, которые люди согласились использовать при выводе следствия из предположений. Есть два вида логики: качественная, или общая, логика и количественная, или математическая. Если наши данные и обобщения количественны, нам необходима математика для построения теории, которая установит количественные соотношения между обобщениями и предскажет их новые варианты. Вот почему научные теории математичны.

Помимо связывания уже известных обобщений и предсказания новых, теории служат еще и третьей цели: они часто позволяют перебросить мост между областями, в которых возможны эксперименты, и теми областями исследований, где нам приходится ограничиваться только чистыми наблюдениями. Это особенно важно в таких областях, как, например, астрофизика или генетика человека и животных.

Научный способ организации познания — весьма современное изобретение. Благодаря ему наука быстро выросла и достигла поразительных успехов в решении практических проблем. Его основная социальная польза состоит в том, что он разрушает или изменяет естественную основу давно принятых обычаев и установлений. Так бывало и раньше, но особенность нашего времени — быстрота развития, то есть сила социальной коллизии. Естественно, что люди с научным складом ума существовали во все века. Но наука обязана своим ростом в течение двух или трех последних столетий не биологическим случайностям, породившим таких людей, как Ньютон или Дарвин, а скорее социальной системе, которая дала людям возможность развивать свои таланты, системе организации труда и обмена информацией, которая позволила работать коллективно.

Проблема

Теперь, когда мы представляем себе в общих чертах организацию и выполнение научных исследований, давайте понаблюдаем, как все это происходит в конкретном случае.

Одним из наиболее замечательных свойств запаха является способность этого ненаправленного ощущения вызывать направленный ответ. Животное с парой ушей может определять направление звука с значительной степенью точности и, даже пользуясь одним ухом, примерно установить, с какой стороны звук громче. Слышание направлено, как и зрение, а ощущение запаха, равно как и ощущение вкуса, направления не имеет. В самом деле, вкус еды не зависит от того, справа или слева от обедающего расположена кухня: ведь вкус или запах мы ощущаем только при физическом контакте молекул вещества с нашими органами чувств, которые могут сообщить нам только то, что эти молекулы прибыли, но не то, откуда они прибыли.

Проблема выслеживания источника запаха не сложна, например, для собаки. Она может бегать во всех направлениях, опустив нос к земле, распутывая заданный след и не обращая никакого внимания на все другие запахи, встречающиеся на пути. Если собака теряет запах, она начинает кружить и искать его вновь, потому что помнит нужный ей запах, даже если не ощущает его. «Поймав» запах, собака идет вперед, а не назад по своему следу, потому что все время какие-то участки ее сознания регистрировали и отмечали, где она уже проходила. А на следующий день, например, она может выслеживать другой запах, потом — третий и т. д., и все потому, что способности ее не ограничены восприятием только одного какого-либо запаха.

Совсем другая и несколько более простая проблема возникает, когда какое-нибудь животное, например олень, чувствует запах охотника, осторожно приближающегося с наветренной стороны. Запах охотника вызывает в мозгу оленя тревожный сигнал, в результате чего животное под-

нимает голову и втягивает воздух, поворачивая голову в разные стороны, пока не установит направление ветра, которое подскажет ему, откуда грозит опасность.

Для того чтобы собака могла выследить добычу в поле, а олень — благополучно избежать встречи с охотником, сложный аппарат органов чувств должен передать большое количество информации в сравнительно высоко организованный мозг животного. Такая работа совершенно непосильна для мозга насекомого по очень простой причине: он в тысячи раз меньше.

При ограниченном весе насекомых, например комара или плодовой мушки, природа предусмотрела у них множество систем: топливную, двигательную, механизм приземления и, наконец (что совершенно не нужно самолету), полную программу, спецификацию и аппарат воспроизведения себе подобных. В связи с такой перегрузкой воспринимающие (сенсорные) устройства насекомых и емкость их мозга должны быть сведены к минимуму. Тем не менее многие крошечные насекомые способны находить источник запаха, причем делать это сравнительно быстро, и, что еще более любопытно, в «бесплотном» пространстве, где нет никаких следов (в земном смысле этого слова) и примет и где сам запах движется от каждого колебания листка. Известны опыты, когда бабочку-самку размером не более почтовой марки, заключенную в бумажную коробочку, находили предварительно помеченные самцы, которые были выпущены на большом расстоянии от нее с подветренной стороны. В одном из таких опытов насекомым приходилось пролетать несколько километров над открытой водой, чтобы достичь небольшого островка, где находились самки.

Эта замечательная способность оказывается еще более удивительной, по мере того как мы углубляемся в ее изучение.

Следует сразу отказаться от элементарного и совершенно неверного представления, что летящее насекомое реагирует на запах, так же как и олень, — ориентируясь по направлению ветра. Олень твердо стоит на земле, то есть, выражаясь научно, занимает фиксированное положение, а ветер обдувает его, поэтому он может ориентироваться по ветру. Это справедливо и для насекомого, но только пока оно не взлетит; в тот самый момент, когда насекомое покидает точку опоры, это утверждение уже

перестает соответствовать истине. Оторвавшись от земли, любое живое существо, будь то насекомое, птица или даже человек, утрачивает точку опоры и вынуждено подчиняться ветру, подобно пушинке или воздушному шарик. Если это живое существо владеет средствами передвижения по воздуху, то есть имеет мышцы и крылья или двигатель и воздушный винт, оно может создавать свой собственный ветер, представляющий собой лобовое сопротивление движению; направление этого ветра зависит от направления движения, а не истинного ветра. Это похоже на движение корабля в открытом океане: течение незаметно, если не ориентироваться на какой-нибудь фиксированный на земле или на небе предмет. Аналогично этому насекомое, птица или летчик могут корректировать свое перемещение в воздухе только по наземным предметам или небесным телам, и никак иначе. Именно поэтому чрезвычайно интересно выяснить, каким образом насекомое может столь уверенно передвигаться против ветра к источнику привлекающего его запаха.

Разработка этой проблемы (в той мере, в какой это уже сделано) — хороший пример научного исследования. Мы расскажем читателю эту историю максимально подробно и в том порядке, в каком все совершалось, потому что, помимо всего прочего, чрезвычайно поучительно видеть, как могут вознаграждать ошибки.

Как всегда в начале нового исследования, была изучена литература, чтобы убедиться, что данная проблема еще не разрешена; при этом обнаружилось несколько интересных фактов. Во-первых, подтвердилась правильность основного предположения, что самцов насекомых в ряде случаев привлекает к самкам именно запах, а не радиоволны или какой-нибудь другой, еще не известный раздражитель. В некоторых случаях даже были выделены и идентифицированы чистые химические вещества, обуславливающие этот запах; впоследствии оказалось возможным использовать их в качестве приманок в ловушках. Самцы насекомых попадают в ловушки даже несмотря на то, что вместо самки там имеются лишь ничтожные следы вещества, имитирующего запах этой самки. Некоторые авторы отмечали, что самцы насекомых должны обладать удивительно тонким обонянием по сравнению, например, с человеком, так как они прекрасно чувствуют запахи в количествах, совершенно не воспринимаемых человеком.

Разумеется, это, мягко говоря, не слишком строгое заключение, поскольку нет никаких оснований считать, что нос человека и нос насекомого должны быть одинаково чувствительны по отношению к одним и тем же запахам. Вещество, сильно пахнущее с точки зрения человека, для насекомого может иметь очень слабый запах или вовсе им не обладать, и наоборот.

Очень важно было установить, какого количества молекул пахучего вещества, идущего по ветру от самки и привлекающего самца, достаточно для получения им соответствующего сигнала. Чтобы выяснить это, я просмотрел техническую военную литературу о движении с ветром облака боевого отравляющего вещества. Метеорологи, например Суттон, разработали математическую теорию изменения густоты (или концентрации) газового облака, распространяющегося по ветру от небольшого источника, расположенного на уровне земли. Строгий анализ этой задачи является очень сложной проблемой, и на пути ее практического разрешения пришлось сделать ряд допущений, в том числе предположить, что поверхность земли ровна и горизонтальна, а ветер устойчив и равномерен. После всех этих расчетов получилась сложная, но вполне приемлемая формула, результаты вычислений по которой хорошо согласовывались с данными непосредственных измерений концентрации частиц в газовых облаках.

С помощью этой формулы я рассчитал среднее количество молекул вещества, которое должно содержаться в каждом кубическом миллиметре воздуха на различных расстояниях (по ветру) от того места, где находится выделяющая запах самка. Эти вычисления показали, например, что при выделении самкой вещества с постоянной скоростью один микрограмм¹ в секунду при скорости ветра полтора километра в час средняя концентрация пахучего вещества на расстоянии трех километров по ветру должна быть равна приблизительно 60 молекулам в кубическом миллиметре. Это довольно маленькая величина. Однако следует учитывать, что вычисления по математической формуле дают среднюю концентрацию вещества, а в действительности облако запаха имеет слоистую структуру и в нем зоны с концентрацией вещества больше расчетной чередуются с зонами, где концентрация меньше расчетной. Кроме

¹ Один микрограмм равен 10^{-6} г.— *Прим. перев.*

того, насекомые-самцы, по запаху разыскивающие самок, имеют довольно большие и хорошо развитые антенны, которые улавливают пахучие молекулы в большом объеме воздуха. Вполне возможно, что насекомое через некоторые интервалы времени даже «берет пробы» воздуха на своем пути. При этом оно накапливает молекулы пахучего вещества и концентрирует вызываемые ими импульсы до передачи собранной информации в мозг в виде единого сигнала. У большинства (а возможно, у всех) животных существует основной электрический ритм центральной нервной системы, частота которого равна приблизительно 50 периодам в секунду; именно этот ритм может обеспечить действие разметочного механизма такой собирающей схемы. Если мы предположим, что самец летит со скоростью три километра в час и что его антенны имеют площадь два квадратных миллиметра, то в течение пятидесятой доли секунды эти антенны могут уловить в среднем 2000 молекул пахучего вещества. Этого количества должно быть вполне достаточно для возникновения у насекомого ощущения запаха.

Этот расчет, естественно, весьма приблизителен и основан на ряде не вполне доказанных и, следовательно, спорных предположений. Действительное положение вещей варьирует в ту или иную сторону, причем в цифровом выражении, вероятно, может быть ошибка порядка троекратной, но вряд ли более чем десятикратная. Такая неопределенность, в сущности, ничего не значит, так как целью проведения всех этих расчетов было приобрести уверенность в том, что даже при столь ничтожной скорости выделения самкой пахучего вещества, как 1 микрограмм в секунду, на расстоянии более полутора километров от источника запаха насекомое-самец встретит достаточное количество пахучих молекул. Если самок несколько, то ситуация, разумеется, значительно упрощается и тот факт, что самец находит данную самку, вовсе не означает, что он направлялся с самого начала именно к ней.

Такой расчет показывает, что в исключительной эффективности запаха полового аттрактанта¹ нет ничего сверхъестественного. В более широком смысле значение такого расчета заключается в наглядной демонстрации

¹ Раньше в отечественной литературе было принято выражение «привлекательный компонент запаха», эквивалентное английскому «attractant». — *Прим. перев.*

того, как исследования в одной области (в данном случае метеорология и теория газовой войны) дают результаты, которые могут быть использованы в совершенно иной области знаний. В этом как раз и проявляется единство науки.

Кроме того, этот расчет обнаруживает простой путь к пониманию того, как насекомое из ненаправленного ощущения получает ключ к направлению, откуда исходит это ощущение. Действительно, было бы весьма соблазнительно предположить, что насекомое летит в том направлении, в котором усиливается ощущение запаха. Однако по ряду причин этого не происходит.

Во-первых, поскольку запах движется по ветру и все более и более разбавляется в воздухе, средняя интенсивность его падает так медленно, что насекомому, «выслеживающему» источник запаха, придется, вероятно, пролететь примерно с полкилометра, прежде чем средняя сила запаха заметно изменится. Более того, средняя сила запаха и его действительная интенсивность в разные моменты и в разных участках совершенно неодинаковы. Всякий человек, наблюдающий, как уплывает дым от сигареты, может видеть, что этот дым не образует сплошного облака, плотного внутри и разреженного к краям, как предусматривает математическая формула, о которой мы уже говорили. Напротив, дым движется по ветру, образуя сложную систему струек, или потоков, которые постоянно скручиваются, завиваются и растекаются новыми струйками. Для насекомого оказалась бы совершенно невыполнимой задача проделать путь вдоль одной из таких струек. Даже если бы насекомое летело по оси облака запаха, оно все равно не могло бы ощущать постоянно усиливающейся интенсивности запаха, а вместо этого попеременно чувствовало бы усиления и спады силы запаха в зависимости от чередований струек в облаке. То, что органы обоняния насекомого расположены на внешних частях антенн-усиков, делало бы нерегулярность чередования ощущений особенно заметной.

Таким образом, на вопрос о том, как именно летящее насекомое добивается точно направленного ответа на ненаправленное ощущение запаха, ответить далеко не просто.

Обзор научной литературы показал, что энтомологи, по существу, совершенно пренебрегают тем, как трудно насе-

комым определять направление ветра, и поэтому не вносят поправки на дрейф. Лишь в нескольких статьях отмечается, что привлекающий запах заставляет насекомое лететь к его источнику (который обязательно расположен против ветра по отношению к этому насекомому), но не приводится никаких соображений по поводу того, как насекомое может определить, куда именно следует лететь. Лишь один экспериментатор (Кеннеди) сумел оценить эту трудность и попытался изучить ее более или менее систематически. Он ставил опыты с комарами в маленькой аэродинамической трубе, сконструированной таким образом, что на стенки и пол ее под пролетающими насекомыми можно было проецировать движущуюся картину, состоящую из черных и белых пятен. Таким образом, у насекомых создавалась иллюзия полета над землей в ветреную погоду и экспериментатор мог наблюдать, как комары ведут себя в этих условиях.

Когда насекомое, либо человек в самолете, летит прямо по ветру, наземные предметы возникают впереди, проносятся под летящим существом и исчезают позади. При полете против ветра, если ветер не слишком силен, те же наземные предметы движутся по отношению к наблюдателю, как и в первом случае, но только с меньшей скоростью, так как скорость движения наблюдателя относительно земли снижается встречным ветром. Таким образом, движение по ветру и движение против ветра зрительно дают одинаковую картину, с той лишь разницей, что движение против ветра медленнее движения по ветру.

Если направление движения находится под некоторым углом к направлению ветра, то наземные предметы не будут появляться впереди и исчезать позади, а будут двигаться под некоторым углом к направлению полета насекомого (или самолета). Сложные глаза насекомых в силу своего устройства чрезвычайно чувствительны к такого рода движущимся картинам. Следует упомянуть, наконец, еще один вариант: если ветер настолько силен, что насекомое не может передвигаться против ветра и его сносит назад, то картина движения наземных предметов будет обратной, то есть они будут появляться сзади и исчезать впереди. Большинство насекомых находят такое положение весьма неприятным и обычно стараются как можно быстрее приземлиться.

В опытах Кеннеди создаваемый в трубе ветер определенной скорости сопровождался движением пятен, изображающих наземные предметы, причем это движение устанавливалось так, чтобы сбить насекомых с толку в оценке направления ветра и его силы, а также того и другого вместе. Эти опыты показали, что комары всегда могут лететь против ветра, если только они видят под собой «движущуюся землю»; при довольно слабом ветре (около полукилометра в час) им приходится лететь поблизости от поверхности «земли» — для того чтобы хорошо ориентироваться. При более сильном ветре насекомые могли бы лететь выше, придерживаясь курса против ветра, но существует предел, когда ветер становится настолько сильным, что комары вообще не желают летать.

Проведенные Кеннеди опыты, несомненно, очень важны, но они не дают полного ответа на поставленный нами вопрос: каким образом самец бабочки может использовать ненаправленный запах для определения пути к тому месту, откуда этот запах исходит? Кеннеди сам понимал это и писал в своих статьях: «Что касается вопроса о нахождении цели... установлено, что ориентация полета к источнику запаха, приносимого ветром, не является в прямом смысле легко объяснимым явлением». И еще: «Непонятно, каким образом свободно летящее насекомое строго ориентируется на тепло, влажность или запах потока воздуха». Самое полезное, что автор извлек из своих экспериментов, заключается в следующем: ощущение запаха играет роль спускового механизма в полете насекомого против ветра, который продолжается до тех пор, пока не будет достигнута цель полета.

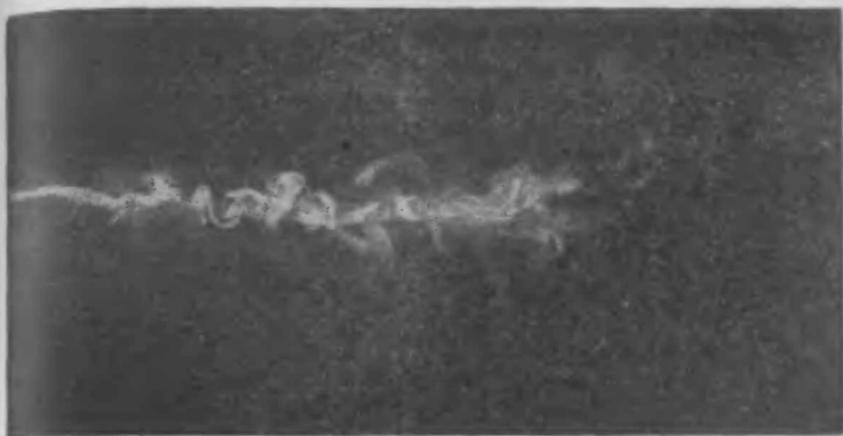
И все же эти опыты — большое достижение, так как они показали вполне ясно, что комары, во всяком случае, пользуются в полете глазами для корректирования своего курса в зависимости от силы и направления ветра. Правда, экспериментатор не объяснил, как насекомые делают то же самое ночью или во время полета над гладкой водной поверхностью, когда отсутствуют наземные отметки, по которым можно было бы установить курс. Кроме того, ничего не известно о механизме, который помогает насекомому отыскать потерянный запах, если оно в полете отклоняется в сторону или пролетает мимо цели.

Ответ

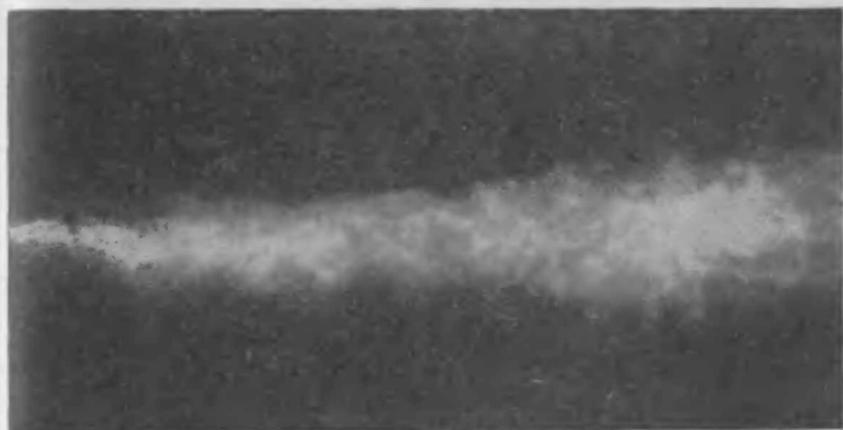
Таково было положение, когда я стал задумываться над проблемой ориентации насекомых по запаху. Особенно сильное впечатление производили сообщения о насекомых, летающих ночью или над открытой водой и тем не менее успешно отыскивающих самок. По-видимому, это свидетельствует о том, что некоторые насекомые способны находить источник запаха, не имея фиксированных ориентиров на поверхности, над которой они пролетают. Кроме того, я был убежден, что комары, с которыми экспериментировал Кеннеди, могли вести себя не точно так же, как бабочки или плодовые мушки. Итак, я заинтересовался структурой пахучего облака, которая, возможно, сама по себе могла бы подсказывать насекомому нужное направление полета и сделала бы не обязательным визуальный контакт с поверхностью земли.

Я потратил массу времени, наблюдая клубы дыма в импровизированной аэродинамической трубе и фотографируя их, и даже умудрился делать «срезы» этих облаков, затемняя трубу и освещая дым светом от узкого щелевого источника. В результате всех этих экспериментов я много узнал об очень сложной волокнистой структуре настоящего дыма или пахнущего следа (фиг. 1), столь сильно отличающейся от усредненной картины (фиг. 2), которую дает упоминавшаяся выше математическая формула. Это еще раз подтверждало «сложность» любого ощущения запаха у насекомых, пролетающих через такое облако. Наконец, я разработал рабочую гипотезу, или временную теорию, того, каким именно образом летящее насекомое может ориентироваться по запаху.

Поскольку пахучее облако имеет определенную дискретную, то есть прерывистую, структуру, кажется вполне вероятным, что насекомое со своим весьма чувствительным воспринимающим аппаратом, расположенным на внешних частях усиков, должно воспринимать запах не как непрерывное ощущение, а как серию импульсов, идущих через неравные интервалы. Более того, при движении к центру облака запаха, а также по мере приближения к источнику запаха эти импульсы должны поступать чаще;



Ф и г. 1. Очень кратковременная (электронная) вспышка помогает увидеть мгновенную картину постоянно меняющегося следа — дыма или запаха, — по которому должно лететь насекомое.



Ф и г. 2. Многократное фотографирование на один и тот же кадр показывает усредненную картину следа, какой рисует ее математическая формула.

наоборот, при удалении от центра облака к его периферии или удалении по ветру от источника запаха частота поступления этих импульсов должна уменьшаться. Таким образом, можно было бы считать, что уже в самом облаке запаха заключен некоторый указатель направления, используемый летящим насекомым каким-либо способом, например только что описанным.

Находясь в свободном полете до встречи с облаком запаха, насекомое может производить поиск, проделывая серии длинных зигзагов. Если, войдя в облако, оно будет ориентироваться по уменьшению интервалов между импульсами, это укажет ему правильный путь к источнику запаха. Наоборот, при выходе из облака или удалении от источника интервалы между поступающими импульсами будут увеличиваться, что заставит насекомое повернуть назад. Если в этом случае оно оставит первоначальный путь и проделает серию коротких резких зигзагов, то это, вероятно, позволит ему запеленговать направление, в котором интервал между импульсами снова начнет уменьшаться. Таким образом, очень простой набор сигналов и ответов на них должен дать насекомому возможность с большой точностью определить направление источника запаха без использования наземных ориентиров.

Сигнал

Ответ

Нет

Длинные зигзаги (поиск запаха)

Импульсы с уменьшающимися интервалами

Прямой полет (к источнику запаха)

Импульсы с увеличивающимися интервалами

Короткие зигзаги (поиск направления полета к источнику запаха)

Считается, что этот вариант хорошо известного руководящего поведением механизма, который получил название клинокинеза, используется многими низкоорганизованными животными. Мокрицы, например, могут существовать только в условиях высокой влажности. Пребывая в них, они ведут себя спокойно и двигаются мало. Однако, если влажность значительно уменьшается, мокрицы чаще меняют направление движения и, наоборот, если увеличивается, хотя и не до необходимого значения, — реже. Итак, наблюдения показывают, что этот механизм совершенно автоматически отклоняет путь насекомого от направления.

в котором условия существования ухудшаются, и направляет его в сторону, где они лучше. Название «клинокинез» призвано отразить контроль направления путем изменения частоты беспорядочных движений.

Вообще говоря, если мы вносим хоть ничтожный элемент систематичности или цели в какой-то беспорядочный процесс, то конечный результат можно рассчитать совершенно точно; этот факт хорошо известен владельцам казино, которые заинтересованы только в постоянном проценте с оборота, приносящем хорошую прибыль независимо от выигрышей или проигрышей отдельных игроков.

Теория обонятельного коррегирования (ориентации по запаху), на которой я временно остановился, является, по существу, единственной в своем роде, так как в ней учитывается элемент беспорядочности движения насекомых. Эта теория предполагает, что насекомые вообще движутся хаотично, а упорядоченность их движений увеличивается или уменьшается в зависимости от сигналов, поступающих из окружающего пространства. Эта теория была (а в обсуждаемом виде и есть еще) совершеннее других, потому что ее можно проверить экспериментально.

Для этого нужно выбрать подходящий вид насекомых и выработать такой метод наблюдения за ними, при котором насекомые могли бы летать в условиях, максимально приближенных к естественным.

Мы остановились на обыкновенных плодовых мушках (*Drosophila melanogaster*), которых обычно находят на гроздьях бананов; наш выбор был обусловлен легкостью разведения этих мушек в лабораторных условиях, а также их хорошо развитой способностью отыскивать гниющие фрукты. Мой коллега Келлог соорудил большую фанерную аэродинамическую трубу (длиной три с половиной метра и поперечным сечением около четверти квадратного метра), в которой свободный полет насекомых не оставлял ощущения ограниченности замкнутого пространства. Пол и потолок этого сооружения были стеклянные, что позволяло нам наблюдать, как насекомые отыскивают кусочек перезрелого банана, помещавшегося с наветренного конца трубы. Мы не только наблюдали, но и производили кино съемку плодовых мушек, причем полученные пленки просматривали с замедленной скоростью, а иногда и пускали фильм в обратном направлении в надежде увидеть, каким образом эти ловкие охотники за гнилыми

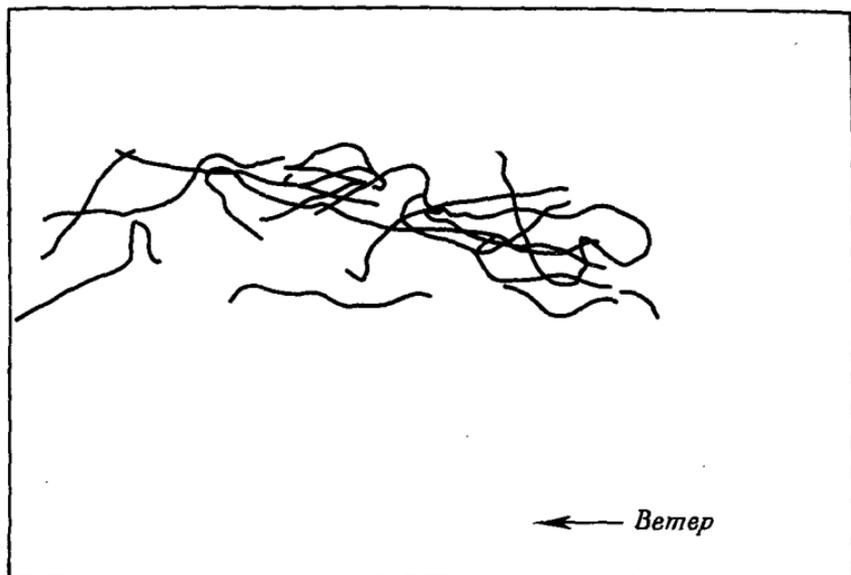
фруктами проделывают свой путь. Кроме того, у нас была возможность проецировать движущиеся световые пятна на пол трубы, как это делал Кеннеди, для того чтобы сбивать насекомых с толку в определении направления ветра.

Начав проводить опыты, мы очень скоро обнаружили, что плодовым мушкам необходимо видеть поверхность, над которой они пролетают, если они намерены найти цель, находящуюся против ветра. С помощью по-разному движущихся световых пятен нам удавалось заставлять их лететь по ветру, в то время как они считали, что летят против него, или под углом к истинному направлению ветра, в результате чего насекомые отклонялись в сторону и пролетали мимо приманки. Оказалось даже, что, если при помощи движущихся световых пятен создать впечатление очень сильного ветра, плодовые мушки вообще прекращают полет. (Эти насекомые терпеть не могут летать, когда скорость ветра превышает три километра в час.) Таким образом, уже с самого начала пришлось отказаться от одной из основных моих идей относительно ориентации насекомых (по крайней мере плодовых мушек) по запаху, так как стало очевидным, что ориентиры, указывающие им направление ветра, расположены на земле.

То, что наши мушки при полете пользуются зрением, удалось подтвердить опытами. Когда пол и потолок аэродинамической трубы покрыли красным целлофаном, увидели, что движущиеся световые пятна красного цвета не оказывают на насекомых никакого действия. Профессор К. Фриш (Германия) доказал, что глаза пчел нечувствительны к красному цвету¹. Мы обнаружили, что это, вероятно, в той же мере относится и к плодовым мушкам, так как при красных декорациях они летали очень мало и очень близко к полу, причем не реагировали на движущиеся световые пятна.

Это открытие оказалось очень полезным, поскольку у нас появилась возможность фотографировать насекомых на панхроматическую пленку, чувствительную к красному свету, не рискуя потревожить наших пациентов ярким светом вспышки.

¹ Читателям, интересующимся этим вопросом, можно посоветовать обратиться к книге известного немецкого ученого Карла Фриша «Из жизни пчел», изд-во «Мир», М., 1966.— *Прим. ред.*



Ф и г. 3. Путь плодовых мушек против ветра к небольшому источнику запаха. Среди линий есть короткие, поскольку фотокамера зафиксировала полет на ограниченном участке пути.

Результаты последующих опытов в общем вполне согласовывались с моей клинокинетической теорией ориентации по направлению ветра. Если через трубу продувался чистый воздух, а привлекающий запах гниющего банана поступал из маленькой стеклянной трубочки, плодовые мушки избирали очень сложный и извилистый путь к источнику запаха (фиг. 3). Иногда, чтобы проследить за распространением запаха, к его току мы добавляли немного дыма. Насколько можно было судить, общая картина полета состояла из большого числа довольно беспорядочных перемещений, оказавшихся в конце концов в достаточной степени направленными, чтобы привести насекомых к источнику запаха.

Если постепенно снижать скорость ветра в трубе вплоть до его полной остановки, мушки, несмотря на привлекающий запах, прекращают полет и начинают просто ползать по стенкам. Остается предположить, что в безветренных условиях «волокна» пахучего облака очень быстро расползаются и сглаживаются, в результате чего насекомые не

получают больше ощущения пульсирующего запаха и, следовательно, не располагают ключом к направлению, хотя и чувствуют, что где-то поблизости — нечто вкусное. В этих условиях самое разумное — приземление и поиск пешком, что они и проделывают.

Итак, до сих пор все было хорошо.

После этих предварительных опытов мы приступили к непосредственной проверке моей теории, основанной на модификации обычного клинокинеза и предполагавшей, что запах от локализованного источника распространяется по ветру в виде клубка волокон и, следовательно, воспринимается насекомым как беспорядочная серия импульсов или обонятельных «всплесков». Проверить ее можно было, исходя из следующего. Если запах воспринимается в виде всплесков и тем самым производит направленное ощущение, тогда при отсутствии этих всплесков такого ощущения не должно было бы получаться, то есть мушки не будут реагировать на воздушный поток, равномерно пропитанный привлекающим запахом, и будут — на такой, в котором струйками чистого воздуха создаются всплески. Иначе говоря, нам нужно было, создавая «негативные всплески», ожидать такой же реакции насекомого, какую они обычно дают на «позитивные всплески», поскольку после одного-двух импульсов различия в сериях этих импульсов утрачиваются. Действительно, много ли различий между такими сериями:

...импульс, пауза, импульс, пауза... или... + — + — + ...

и

... пауза, импульс, пауза, импульс... или... — + — + — ...?

Очень довольный придуманным способом проверки, в котором, казалось, все учтено, я с помощью Келлога и Фрицеля предпринял попытку осуществить его.

Прежде всего необходимо было как можно равномернее пропитать воздух в нашей трубе запахом гниющих бананов. Это оказалось нелегкой задачей, и мы уже в первых опытах получили ошибочно обнадеживающие результаты, когда плодовые мушки действительно совершенно не реагировали на равномерно пропитанный запахом ветер. Вполне возможно, что запах в этих опытах был скорее слишком слаб, чем равномерен. Чтобы быть уверенными в равномерном распределении запаха, мы несколько

изменили методику проведения опытов: один конец нашей трубы закрыли пятисантиметровым слоем пенопласта, пропитанного кашицей из бананов и дрожжей, а перед наблюдательной камерой установили смеситель с электровентилятором. Затем в дальнем конце трубы поместили проволочную клетку с дверцей, которую можно было, дернув за веревочку, внезапно открыть извне. Идея заключалась в том, чтобы мушки попадали в камеру наблюдений только тогда, когда условия в трубе делались по возможности однородными. Как уже говорилось, если бы теория была верна, то плодовые мушки не должны были реагировать на равномерно пахнущий ветер, пока мы не создали бы в нем искусственных неравномерностей или всплесков, вводя струйки чистого воздуха.

И все шло прекрасно вплоть до того момента, когда мы открыли клетку. Выпустив тучу мушек в наш равномерно пропитанный запахом воздух, мы были повергнуты в совершенное изумление.

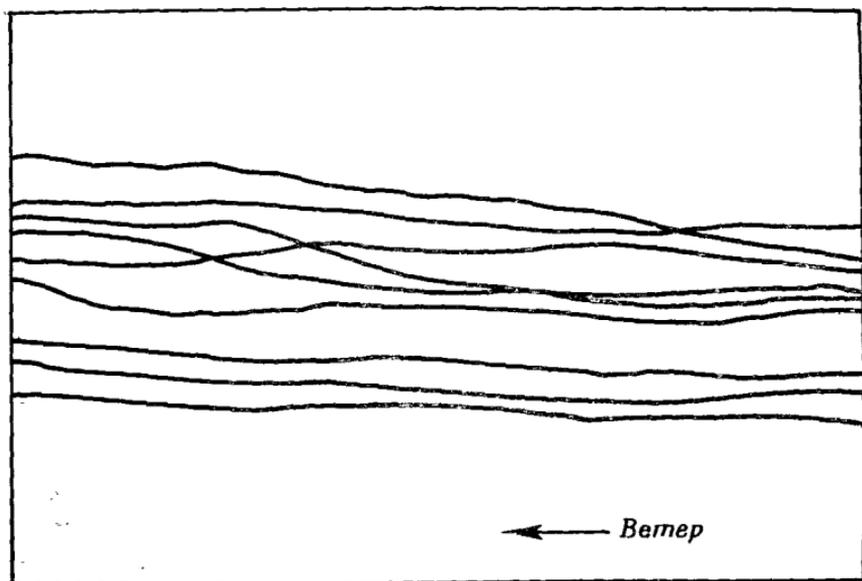
Освободившиеся мухи не стали сидеть и ждать, когда их возбудит пульсация запаха. Вместо этого они полетели прямо против ветра с той максимальной скоростью, на которую были способны, и уселись на перегородку в соответствующем конце туннеля. Фотографии показали, что направление их полета было очень близким к прямой линии, гораздо более близким, чем когда-либо наблюдаемое при полете насекомых (фиг. 4).

Никогда еще результат опыта не оказывался столь неожиданным, а рабочая гипотеза — так внезапно опровергнутой. В то время как я думал, что беспорядочность движения заложена в насекомых и что окружающая среда систематизирует их поведение, оказалось, что (по крайней мере для *Drosophila melanogaster*) хаотичность свойственна окружающей среде, а насекомые ведут себя настолько организовано, насколько позволяет среда.

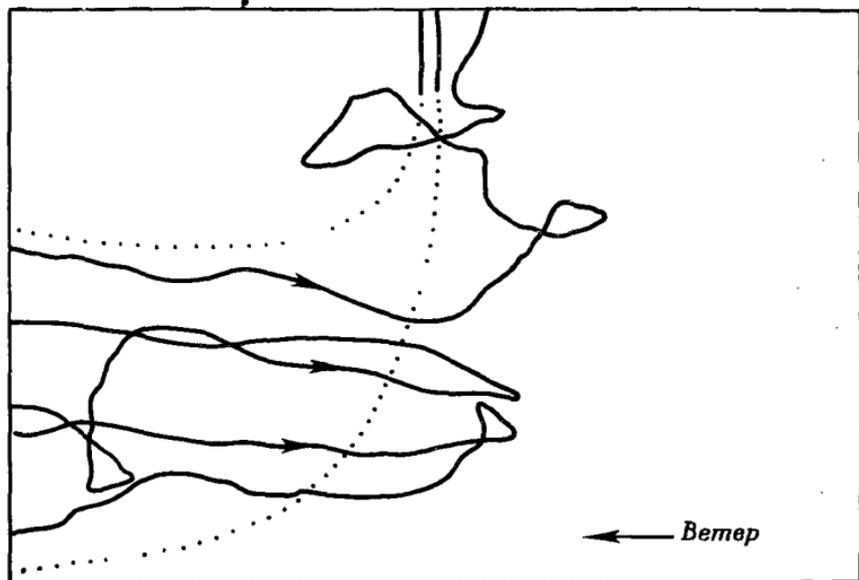
Устойчивый сигнал запаха вызвал у насекомых реакцию, выразившуюся при визуальном наблюдении с поверхности, над которой проходил полет, в абсолютно прямом движении против ветра. Эксперименты, однозначно показав это, тем самым дали прочную (и совершенно неожиданную) основу для нового этапа работы. Итак, ответ был получен, но его нельзя было считать полным, так как равномерно пахнущий поток воздуха был создан искусственно, и как он не походил на естественные пахнущие следы, так

и прямой полет мушек в нашей трубе был не похож на обычный извилистый путь насекомых к кусочку банана. Теперь мы знали, что делают мушки, когда чувствуют привлекающий запах, но мы еще не знали, как они ведут себя, когда перестают ощущать его. До тех пор пока мы этого не знаем, мы не можем объяснить, почему они не пролетают мимо источника запаха и что они делают, когда вылетают за пределы пахнущего потока. Очевидно, в условиях нашего опыта трудно, используя воздух, пропитанный запахом, внезапно удалить этот запах, и все-таки именно это нужно было проделать, чтобы получить ответ на интересующий нас вопрос.

К счастью, мы довольно легко справились с этой задачей. Во время опытов нам приходилось из тонкой стеклянной трубочки впускать в чистый воздух трубы струйки пахнущего воздуха. Оказалось, что, если эту стеклянную трубочку у конца трубы направить снизу вверх или разместить горизонтально, ориентируя вдоль потока воздуха, отверстие приходится защищать, надевая на него кусочек марли, — иначе мушки садились на этот конец трубочки и даже залезали внутрь, очень быстро забывая ее.



Ф и г. 4. Полет плодовых мушек против ветра в потоке воздуха, равномерно насыщенного запахом.



Ф и г. 5. Путь плодовых мушек, пытающихся найти источник запаха, когда струйку насыщенного запахом воздуха направляли сверху в поток непахнущего воздуха.

И вот однажды мне пришло в голову поместить эту трубочку в верхней части туннеля, чтобы струйки пахнущего воздуха сверху попадали в воздушный поток и уносились ветром. Тогда насекомые, летящие горизонтально навстречу ветру, внезапно вылетали бы за пределы потока запаха и при этом, можно надеяться, не видели бы конца находящейся над ними и источающей запах стеклянной трубочки, так как их глаза, вероятнее всего, будут нацелены вниз. (Ведь гниющий плод скорее всего лежит на земле, а не висит на дереве, и приближаться к нему, естественно, нужно сверху или сбоку, но не снизу.) Опыты с использованием этого простого трюка удались полностью: после того как подающую запах трубочку поместили вверху туннеля, направив вниз, ни одно насекомое не нашло этого источника запаха.

Сфотографировав в этом полете плодовых мушек (фиг. 5), мы обнаружили, что, как и раньше, они летели вдоль потока уверенно, но только пока чувствовали запах, а, потеряв его, через очень короткий промежуток времени — обычно около $1/5$ секунды — поворачивали и раз-

летались под прямым углом к направлению ветра (то есть к направлению своего первоначального полета). Они могли свернуть вправо или влево, вверх или вниз, но первой их реакцией на потерю запаха была именно быстрая смена направления полета с движения против ветра на движение поперек него. Если мушки в результате такого маневра снова находят запах, то они снова поворачивают и летят против ветра. Если же насекомые не обнаруживают запаха, то они пытаются отыскать его, повторяя один или два раза поперечные броски, а потом возвращаются назад, пролетая некоторое расстояние (несколько сантиметров или полметра) по ветру, после чего вновь совершают поперечные броски в поисках запаха. Этот результат очень четко воспроизводился во многих опытах; когда стайка плодовых мушек долетала почти до конца туннеля, она, казалось, натыкалась на расположенный поперек него невидимый барьер, находящийся приблизительно на уровне трубочки, подающей пахнущий воздух. В то же время все это выглядело так, будто их поведение было чисто механическим; на это указывала совершенная неспособность насекомых отыскать конец этой трубочки, когда она была расположена сверху и направлена вниз.

Время реакции, составляющее примерно $\frac{1}{5}$ секунды, представляет особый интерес, так как оно было больше, чем время, необходимое мушкам для перелета от одной пахнущей струйки облака до другой. Если время реакции столь длительно, то мой клинокинетический механизм должен был бы действовать вдали от источника запаха, а на малых расстояниях от него клинокинез затруднялся бы.

Таким образом, на этот раз моя оригинальная теория ориентации против ветра была полностью опровергнута, по крайней мере для плодовых мушек. Тем не менее она сыграла свою положительную роль, поскольку, исходя именно из нее, мы обдумывали и проводили наши эксперименты. Опыты целиком и полностью опровергали сделанные на основе этой теории предсказания, и это была удача, так как мы вышли на верный путь. Гораздо чаще эксперименты дают еще более ничтожные результаты, из которых вообще трудно сделать какие-либо выводы.

То, что мы в итоге всей этой работы все-таки были удовлетворены, не должно затмевать главной морали описанной истории: неправильная теория, которая толкает вас на постановку эксперимента, дающего плодотворные

результаты, лучше, чем отсутствие какой бы то ни было теории. Если бы у нас не было с самого начала никакой теории ориентации насекомых, пришлось бы потратить массу времени на наблюдение за плодовыми мушками, просто разыскивающими путь по обычному волокнистому следу запаха, причем это не прибавило бы нам много знаний. Одна из двух наиболее важных функций теории состоит в том, чтобы стимулировать эксперименты путем построения предположений, которые можно проверить опытным путем. Большинство таких предположений оказывается неверным и никогда не публикуется. Именно поэтому у человека, далекого от науки, может создаться ложное впечатление, будто наука неуклонно движется вперед от одного несомненного успеха к другому. Надеюсь, мне удалось показать, что на самом деле это далеко не всегда так.

Насекомые

Не все насекомые руководствуются запахом в поисках дороги, пищи, пары или места для откладывания яиц. Ползающие виды, возможно, часто ориентируются по форме поверхности или по ее цвету, а многие имеют что-то вроде органов вкуса не только во рту, но и на лапках. Температура и влажность тоже могут служить ориентирами, а некоторые насекомые реагируют на колебания, хотя, пожалуй, слишком смело было бы называть это слухом. Недвижимые блохи, например, оживают, когда «слышат» шаги приближающейся жертвы, а стрекотание помогает сверчкам находить друг друга. Предполагают, что самцы комаров, по крайней мере отчасти, определяют местонахождение самок по звуку, производимому их крыльями; предлагалось даже использовать записи этого звука для заманивания самцов в ловушки. (Для природы было бы технически довольно сложно сконструировать слуховой аппарат, который, различая еле слышный писк комара, умещался бы в его теле. Поэтому считают, что приемниками звука у комара служат антенны, колеблющиеся, подобно камертону, в резонанс с источником звука. Это только один пример, относящийся к проблеме, которая возникла при сравнении размеров насекомых и человека.)

Глаза почти всегда необходимы насекомым, и не только для того, чтобы определять направление полета, но чтобы различать цвета и избегать препятствий.

Глаза пчел обладают даже способностью реагировать на еле заметные изменения плоскости поляризованного света неба, причем пчелы используют это свойство для определения нужного направления независимо от ветра. Это особенно важно для медоносных видов пчел. Если бы они могли ориентироваться только по направлению ветра и летать соответственно по ветру и против него, им пришлось бы ограничиться гораздо меньшей территорией для медосбора. Профессор К. Фриш обнаружил, что пчела, нашедшая новую цветущую полянку, может «объяснить» другим пчелам, в каком направлении и на каком расстоянии та находится. Это проделывается в темноте улья, и, уж

конечно, пчелы при этом не разговаривают между собой. Вся необходимая информация передается особым видом «танца» на вертикальной поверхности сотов, причем направление танца относительно вертикали (то есть направления силы тяжести) соответствует направлению, которого должны придерживаться сборщики относительно плоскости поляризованного света, когда они вылетят из улья.

Насколько мне известно, работа Фриша — один из наиболее ярких примеров научного исследования, которое, не говоря уже об изяществе, совершенно не содержит математических расчетов, что делает его вполне доступным рядовому читателю. Труды Фриша представляют собой классику современной науки.

Теперь пришла пора вспомнить о запахе. Ведь после того, как пчелы узнали, в каком направлении и как далеко лететь до места сбора, они должны узнать, с каких цветов вести сбор нектара. Вот тут им и помогает запах.

Вообще говоря, запах наиболее важен для летающих насекомых, но он, вероятно, играет заметную роль и в жизни подавляющей части других насекомых. Поскольку восприятие как вкуса, так и запаха происходит, очевидно, на молекулярном уровне, масштабные трудности, связанные с малыми размерами мелких животных и насекомых, играли наименьшую роль в создании у них обонятельных и вкусовых органов. У насекомых имеется лишь три основных аспекта жизнедеятельности — питание, спаривание и откладывание яиц. Интересно посмотреть, с какими пахучими химическими веществами связаны у насекомых эти стороны их жизнедеятельности.

Запахи, которые привлекают насекомое к пище, имеют прямое отношение к этой пище и никакого — к химическим процессам, протекающим в организме насекомого.

Плодовые мушки, например, питаются только перезрелыми фруктами и даже не замечают зеленых плодов. Говоря точнее, их привлекает не та часть плода, которая им нужна для питания, то есть в основном сок, а вещества, которые вырабатывают другие организмы (например, дрожжи), когда фрукты начинают портиться. При этом плодовых мушек привлекает не сам по себе продукт брожения, спирт, а вещества, которые образуются в процессе его получения. Вот почему эти плодовые мушки обычно прилетают к столу, за которым пьют вино, и их не видно, когда пьют

крепкие спиртные напитки, не содержащие ароматических соединений.

То, что вино, привлекающее плодовых мушек, нравится и людям, — случайное совпадение. На самом деле, если выделить из вина в чистом виде вещества, которые нравятся нам, мушки не обратят на них никакого внимания, а направятся к тем, запах которых нам не покажется сильным или особенно приятным.

Нет ничего удивительного в том, что многих насекомых, питающихся падалью и поэтому весьма полезных как уборщики мусора, привлекают запахи гниения и разложения, столь неприятные для нас. Несомненно, что именно этим и еще экономической невыгодностью разработки подобной проблемы можно объяснить, почему до сих пор мало кто пытался выделять и расшифровывать различные специфические вещества, привлекающие жуков-навозников. Между тем такое исследование могло бы неожиданно оказаться очень полезным. Действительно, было установлено, например, что некоторые виды африканских мух цеце (*Glossina morsitans* и *G. pallidipes*), от которых страдают слоны и скот, в большей степени привлекают навоз и моча животных, чем сами животные. Это еще один пример того, что насекомых может привлечь не сама цель, а нечто ей обычно сопутствующее или каким-то образом связанное с ней.

Создание пищевых аттрактантов для различных насекомых открывает широкое поле деятельности. Ведь насекомых можно привести к кормушке, как лошадей, но вот заставить их есть — это уже особая задача. Молодых гусениц шелковичного червя (*Bombyx mori*) можно приманить к листьям шелковицы с помощью химического вещества β, γ -гексенола, а когда они подрастут, — продукта окисления этого же вещества α, β -гексенала. Но, чтобы заставить гусениц грызть, понадобится уже другое вещество, а ведь, кроме того, нужно, чтобы они еще и глотали!

Оплодотворенная самка насекомого, которая ищет место для кладки яиц, в действительности ищет пищу для своего потомства и для себя. Поэтому поиски удобного места для откладывания яиц в принципе ничем не отличаются от обычных поисков пищи, когда направляющее вещество существует независимо от самого насекомого.

Яйцекладка происходит у насекомых по-разному. Комары, например, откладывают яйца куда попало, в любую лужу стоячей воды, тогда как наездники, паразитирующие на других насекомых, откладывают яйца только в тело личинок этих насекомых, даже если они спрятаны глубоко под корой дерева. Между прочим, интересно, что, отложив яйца, самка наездника метит свою жертву отпугивающим запахом, чтобы ее не использовали для той же цели повторно.

Но даже и при беспорядочной яйцекладке запах играет важную роль. Так, например, комары гораздо чаще откладывают яйца в банки с водой, содержащей такие вещества, как сероводород, старый дрожжевой настой или моча скота, чем в контрольные банки с чистой водой; правда, здесь, помимо запаха, может иметь значение еще и вкус.

Высокая степень точности в выборе места для откладывания яиц имеет важное биологическое значение по следующей причине. Если насекомое достигло зрелости и после спаривания в нем образовались яйца, оно обязано преодолеть все опасности ненадежного и враждебного ему мира. Первый шаг к этому — само появление насекомого на свет, причем, видимо, при благоприятных условиях. Поэтому, если оно отложит яйца в такой же среде, условия развития новых особей могут оказаться не лучшими из возможных, но зато наверняка подходящими. В наиболее благоприятных условиях разовьется наибольшее количество зрелого потомства и со временем в результате естественного отбора будет достигнута исключительно высокая степень специализации.

Опыт показывает, что такая специализация, по-видимому, в гораздо большей степени фиксируется в генетической структуре, чем приобретается в процессе обучения; это подтверждается, например, следующим. Обычной жертвой паразитирующего *Nemeritis* является насекомое, известное под названием *Ephestia*, причем этот паразит никогда не поражает других насекомых, в том числе и восковую моль (*Meliphora grisella*). Однако если гусениц *Meliphora* перемешать с гусеницами *Ephestia*, то паразитирующие *Nemeritis* могут ошибиться и отложить яйца в личинки *Meliphora*. Яйца в этих новых условиях развиваются вполне нормально, но новое поколение предпочитает паразитировать все же на старом хозяине (то есть на

Ephestia), хотя гусеницы восковой моли привлекают их уже несколько больше, чем паразитов, развившихся обычным путем. Это можно было бы рассматривать как своего рода обучение, но слишком уж мал мозг насекомых, чтобы мода было допустить подобное. Описанные эксперименты проводил Торп, который нашел, что даже через несколько поколений *Nemeritis*, выведенные на «ошибочном» хозяине, продолжали отдавать полное предпочтение первоначальному хозяину. В этих опытах насекомых насильно заставляли паразитировать на «ошибочном» хозяине, без всякой свободы выбора, чтобы не было возможности создавать генетическое предпочтение. Подобные же эксперименты, проведенные на плодовых мушках *Drosophila*, с выращиванием этих насекомых на среде, содержащей перечную мяту, запаха которой *Drosophila* обычно избегают, показали, что через шесть поколений у них вырабатывается некоторая адаптация (то есть привыкание) к питательной среде, до тех пор чуждой им (по запаху).

Таким образом, предпочтение столь же устойчиво, сколь и специализированно.

Существуют жуки-короеды, которые поражают только один вид, а часто даже одну разновидность деревьев, например горную сосну, и не встречаются на так называемой скрученной сосне. Чаще всего они нападают только на очень старые, больные или почему-либо ослабленные деревья этого вида. Правда, заболевание деревьев может быть в свою очередь вызвано плесенью, вирусом или, наконец, нападением других насекомых. Часто можно отличить больные деревья от здоровых, только обнаружив на них короедов.

Одним из наиболее интересных и наглядных примеров такого рода являются скопления огромных количеств «дымных жуков» (например, *Melanophila consputa* и *M. atropurpurea*) на выгоревших лесных участках. Этих насекомых, как оказалось, очень привлекает запах дыма. Наблюдала, как они кружат над горячей поверхностью опаленных деревьев, отыскивая, по-видимому, подходящее место для откладывания яиц. Когда дерево погибает от жары и огня, вместе с ним погибает большинство гнездящихся в нем насекомых и паразитов. Поэтому вновь прибывшие попадают на свободное место. В этом состоит оригинальное биологическое преимущество «дымных жуков», их особая специализация, причем совершенно не обязатель-

но, чтобы дым был древесного происхождения. Иногда горящие нефтехранилища собирают огромные количества жуков, причем прилетают они с удивительно больших расстояний. Несколько лет назад в Калифорнии загорелось около 120 тысяч тонн нефти. На пожар слетелись несметные полчища этих насекомых, садившихся решительно повсюду и даже кусавших случайных зрителей. Ближайшее место, где росли хвойные деревья и откуда могли прилететь эти жуки, было расположено не менее чем в 80 километрах от места пожара, так что дальность полета этих насекомых столь же замечательна, как и острота их обоняния.

Табачный дым тоже привлекает этих жуков, и время от времени болельщики во время важного футбольного матча оказываются жертвами их непрошеного внимания.

Не известно, какие именно вещества, содержащиеся в дыме, привлекают насекомых, и установить это довольно сложно. Сложность в данном случае заключается не только в содержании и сохранении нужных для опытов насекомых, но и в том, что дым представляет собой очень сложную смесь различных химических веществ. Состав дыма зависит от того, что и как было сожжено. Этим, вероятно, можно объяснить периодически поступающие сообщения, что во время праздников, когда мясо жарят прямо на улице, слетаются «дымные мухи», которые, как оказалось, совершенно безразличны к обгоревшему дереву. В этих случаях, по-видимому по чистой случайности, образуются вещества, которые чем-то напоминают обычные аттрактанты, привлекающие этих насекомых.

Таким же образом, наверное, можно объяснить, почему однажды запах белил собрал сотни жуков вида *Priacma serrata*, а жидкость для химической чистки, содержащая трихлорэтилен, показалась привлекательной мухе *Coelopa frigida*; даже простой керосин использовали для отлова средиземноморской плодовой мухи.

Обычно можно легко решить, какой именно аттрактант привлечет насекомых — пищевой или указывающий наиболее подходящее место яйцекладки, поскольку пищевой аттрактант всегда собирает и самцов и самок, а также неполовозрелые или личиночные формы, тогда как указатель места яйцекладки собирает исключительно самок. (Однако аттрактант может собрать самок, которые в свою очередь соберут самцов, так что выводы о характере первого прив-

лекающего запаха надо делать с осторожностью.) Особенно интересны аттрактанты, привлекающие только самцов. Такие вещества обычно выделяются самками и, следовательно, представляют собой специфические продукты метаболизма этих насекомых. Пищевыми аттрактантами, или аттрактантами, указывающими место яйцекладки, могут быть практически любые вещества из окружающей среды. Половые аттрактанты образуются в теле насекомого, поэтому можно ожидать, что изучение их строения прольет некоторый свет на природу обоняния насекомых, а возможно, и высших животных.

Мы знаем—или по крайней мере можем предполагать,— что эти вещества действуют именно на обоняние, так как, для того чтобы вызвать у самцов энергичную реакцию, достаточно ничтожного количества вещества, измеряемого пикограммами (один пикограмм равен одной миллионной миллионной доли грамма, то есть 10^{-12} г). Это примерно соответствует чувствительности нашего обоняния. Ни одно из других чувств животных, даже ощущение вкуса, не достигает такой остроты.

Природа реакции самцов на эти вещества обычно весьма характерна и специфична, так как она связана с половым поведением. Это означает, что мы располагаем очень чувствительным методом биологического анализа, который делает возможным (хотя, несомненно, это очень трудно) выделение природного полового аттрактанта в чистом виде и установление его химической природы. Объем такой работы можно оценить на примере группы немецких ученых, которые под руководством доктора Бутенандта собрали и выделили в чистом виде половой аттрактант самки тутового шелкопряда (*Bombyx mori*). Чтобы оценить необыкновенное терпение и настойчивость, необходимые для подобных исследований, не обязательно подробно описывать все стадии этого процесса. Достаточно приводимого ниже краткого описания проделанной работы.

Исходным материалом для исследователей послужили пахучие железы 313 000 самок бабочек шелкопряда. (Представьте себе — отделить кончик брюшка у трети миллиона бабочек!) Каждый отрезанный кончик опускали в петролейный эфир и хранили в нем, пока не собрали весь материал. Потом его гомогенизировали в воде, испаряли воду при низкой температуре (чтобы смесь не «сварилась»), а сухой остаток экстрагировали эфиром;

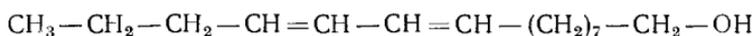
Эфирную вытяжку объединили с растворителем, в котором хранили исходный материал, а потом отогнали оба растворителя. В результате было получено темноокрашенное масло, которое содержало, помимо полового аттрактанта, целый набор неизвестных примесей. В процессе разделения этой смеси с целью выделения нужного полового аттрактанта каждую из получаемых фракций испытывали на способность привлекать самцов, чтобы проследить, в какой именно фракции содержится искомое активное вещество.

Темноокрашенное масло сначала встряхивали с эфиром и водным раствором соды. Затем эфирный слой отделяли и эфир испаряли. Полученный остаток, из которого все вещества кислотного характера были экстрагированы карбонатом натрия, растворяли в метиловом спирте и омыляли поташом. Смесь после этого разбавляли водой и опять встряхивали с эфиром. Эфирный слой отделяли и испаряли из него растворитель, а неомыляемый остаток (который и был, как оказалось, биологически активным) растворяли в спирте. Полученный раствор охлаждали, чтобы вызвать кристаллизацию стеринов, а оставшийся (маточный) спиртовой раствор высушивали и удаляли растворитель. После обработки остатка ангидридом янтарной кислоты в присутствии пиридина все спиртовые компоненты превращались в моноэфиры янтарной кислоты. Их отделяли растворением в эфире, и эфирный раствор при дальнейшей очистке опять проходил все стадии, которые я только что описал! В конце концов в результате всей обработки получили очень небольшое количество маслянистого вещества с высокой биологической активностью, но оно все еще было недостаточно чистым.

После дальнейших операций по очистке (которые я не буду описывать: их еще больше и они еще длиннее, чем те, о которых я только что рассказал) осталась очень маленькая капелька — около четырех миллиграммов — маслянистой жидкости. Это и был чистый половой аттрактант, который обладал невероятно сильной биологической активностью. Одна миллионная доля грамма (10^{-6} г) называется, как известно, микрограммом, а одна миллионная доля микрограмма (10^{-12} г, об этом тоже говорилось) — пикограмм. Оказалось, что одной миллионной доли пикограмма (10^{-18} г), растворенной в одном кубическом сантиметре петролейного эфира, достаточно, чтобы выз-

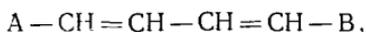
вать возбуждение у самцов шелкопряда. Научное название этой бабочки *Bombyx mori*, поэтому полученный половой аттрактант назвали бомбиколом. Для начала было очень неплохо, но путь к намеченной цели предс еще долгий.

Выделение чистого полового аттрактанта было только самым первым (хотя и совершенно необходимым) шагом на пути к установлению химического строения его молекулы. Сначала было найдено, что молекулярный вес этого вещества немного больше двухсот. Это свидетельствовало о том, что молекула бомбикола может содержать от 40 до 50 атомов. Подобно тому как из 50 деталей детского «Конструктора» можно построить множество моделей, 50 атомов можно соединить друг с другом бесконечным множеством способов. Для современных химиков-органиков не было проблемой (хоть это и нелегкая задача) установить, каким именно образом расположены атомы в молекуле бомбикола. Соответствующими методами было показано, что структура молекулы бомбикола следующая:

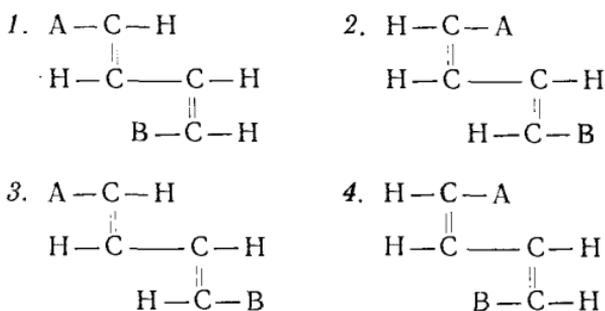


Это так называемая структурная формула. Она показывает, какие атомы входят в состав молекулы и в каком порядке они соединены между собой. Такой способ изображения молекулы расскажет нам о ней не больше, чем радиосхема — о готовом приемнике. Однако эта схема для химика полезнее, чем любое другое изображение молекулы, потому что подсказывает, каким образом можно такую молекулу построить.

Но и изображенная таким способом монтажная схема рассказывает о молекуле далеко не все. Показывая атомы и связи, которыми они соединены, она ничего не говорит о расположении отдельных частей молекулы в трехмерном пространстве. Структурной формуле бомбикола соответствуют по крайней мере четыре разные конфигурации (то есть способа расположения в пространстве частей молекулы), существование которых обусловлено наличием в его молекуле двух соединенных двойными связями пар углеродных атомов. Если сокращенно изобразить структуру этой молекулы как



Эти четыре конфигурации схематически можно представить следующим образом:



Какая из этих структур соответствует бомбиколу? Существует несколько путей решения этого вопроса, но наиболее надежен следующий: нужно синтезировать все четыре вещества и посмотреть, свойства какого из них совпадают со свойствами бомбикола. Поэтому были получены все эти четыре вещества, причем для большей уверенности каждое из них синтезировали трижды, тремя различными способами. В результате было установлено, что половой аттрактант бомбикол имеет структуру 1.

Была испытана также биологическая активность трех альтернативных соединений, причем оказалось, что вещество 2 обладает даже большей активностью, чем природный бомбикол, тогда как соединения 3 и 4 по своей активности гораздо слабее. В этом нет ничего необычного для биологически активных веществ вообще и для пахучих соединений в особенности. Так, известно, что весьма незначительные изменения в структуре или пространственной конфигурации молекулы могут иногда привести к весьма значительным изменениям свойств вещества. Справедливо и обратное утверждение: одинаковый эффект может быть вызван совершенно различными по структуре веществами.

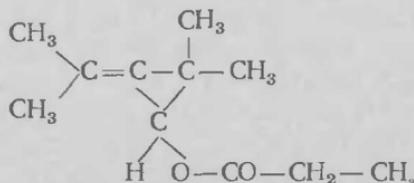
Я рассказал так подробно о работе немецких ученых по исследованию строения бомбикола, чтобы показать, сколько упорного труда скрыто за таким, казалось бы, простым утверждением: «Выделено индивидуальное химическое вещество — половой аттрактант самки тутового шелкопряда — и показано, что...» Именно вследствие огромных трудностей разрешения подобного рода задач до сих пор выделено и изучено лишь несколько химически чистых половых аттрактантов.



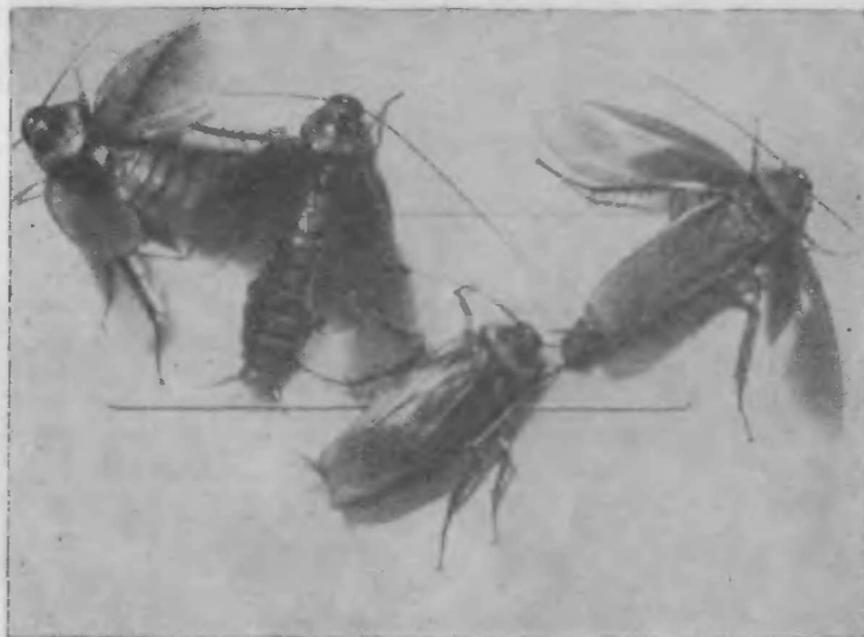
Ф и г. 6. Сбор полового аттрактанта американского таракана. Эти молочные фляги содержали десять тысяч неоплодотворенных самок *Periplaneta americana*. Летучий половой аттрактант с током воздуха, продуваемого через фляги, поступал в охлаждаемую ловушку. Чтобы добыть 12,2 мг аттрактанта, потребовалось девять месяцев.

Совсем недавно доктор Якобсон и его товарищи по работе в Министерстве сельского хозяйства США нашли более легкий способ выделения этих веществ. Они установили батарею металлических контейнеров (используя большие молочные фляги), в которых содержали около десяти тысяч неоплодотворенных самок таракана (*Periplaneta americana*) (фиг. 6). Эксперимент продолжался девять месяцев, причем насекомых время от времени заменяли свежими. В течение всего этого времени через контейнеры продували очищенный воздух, который затем проходил через ловушку, содержащую немного разбавленной соляной кислоты и охлаждаемую твердой углекислотой (сухим льдом). Таким способом этим ученым удалось собрать летучий половой аттрактант и некоторые другие летучие вещества, выделяемые тараканами. Обработать такой материал гораздо проще, чем иметь дело с тканями насекомого; это значительно облегчает процесс очистки.

Выделенный ими половой аттрактант обладал биологической активностью в настолько малых концентрациях, что, по существу, несколько молекул этого вещества вызывали очень сильную реакцию у самцов: возбуждение заставляло их характерным образом поднимать и опускать крылья (фиг. 7). Установлено химическое строение этого полового аттрактанта; его формула приведена ниже



Вряд ли характерное хлопанье крыльями у возбужденных самцов бесцельно или просто является средством привлечения внимания. Такая реакция характерна и для других видов насекомых, причем одно из предположений гласит, что самец гонит таким образом свой запах к самке.



Ф и г. 7. Самцы *Periplaneta americana*, демонстрирующие характерную реакцию на чистый половой аттрактант, который в виде незаметной пленки нанесен на поверхность стекла.

При наличии большого внешнего сходства между двумя разными видами насекомых запах самца, воспринимаемый самкой, возможно, препятствует скрещиванию этих видов. Уже имеются прямые данные, свидетельствующие в пользу этого предположения. Мэйр, например, обнаружил, что в природных условиях между *Drosophila pseudoobscura* и *D. persimilis* никогда не происходит скрещивания. Если у самок удалить антенны, то эти два вида насекомых спариваются почти наугад. Другой ученый, Стрейзингер, наблюдал аналогичную склонность к перекрестному спариванию у *Drosophila pseudoobscura* и *Drosophila melanogaster* после частичной наркотизации самок эфиром. Практическое значение такого рода наблюдений подлежит, несомненно, всесторонней оценке и дальнейшему изучению.

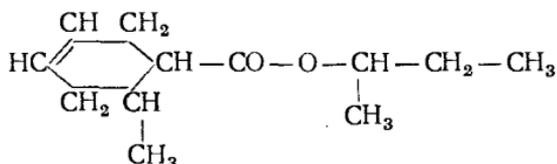
Половые аттрактанты насекомых

Запах полового аттрактанта, который привлекает самцов средиземноморской плодовой мухи (*Ceratitis capitata*), был открыт иным путем. Дело в том, что это насекомое — бич citrusовых; для успешной борьбы с таким страшным вредителем очень важно уметь заранее предсказать его массовое появление, а также оценить степень зараженности. И именно половые аттрактанты в силу своей высокой специфичности оказались наиболее подходящими для этих целей. В марте 1956 г. было обнаружено (главным образом методом «проб и ошибок»), что масло из семян анжелики¹ является мощным фактором, привлекающим самцов средиземноморской плодовой мухи. Широкий отлов показал реальную пользу половых аттрактантов в подавлении массового размножения этих насекомых-вредителей, но на его осуществление ушел весь мировой запас анжеликового масла, исчислявшийся лишь несколькими десятками килограммов. Поэтому начались интенсивные поиски легко синтезируемых и недорогих заменителей аттрактантов.

Для экономии времени ученые сразу отказались от выделения и идентификации природного полового аттрактанта самки средиземноморской плодовой мухи, как это было когда-то сделано с тутовым шелкопрядом. Вместо этого провели отбор среди нескольких тысяч органических соединений в расчете на случайное выявление из их числа веществ, способных привлекать самцов насекомого. При таком отборе сразу обнаружилось несколько основных направлений, разработка которых в исключительно короткий срок привела к открытию нескольких очень удачных приманок для самцов средиземноморской плодовой мухи. Разумеется, менее всего вероятно, что эти заменители действительно повторяют структуру природных половых аттрактантов, которая, как уже говорилось, даже не была установлена, но для практических целей это не имеет никакого значения. Одно из испытанных соединений, столь же эффективно привлекавшее вредных насекомых,

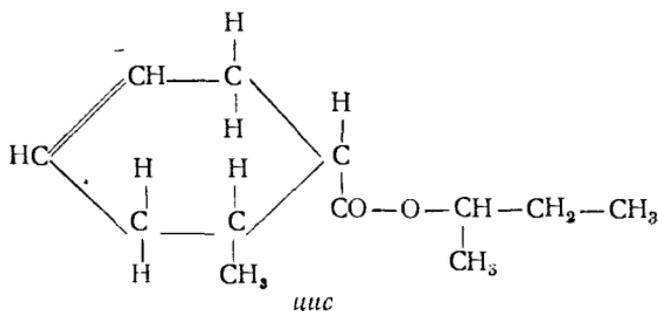
¹ В СССР это растение называют еще дягилом.— *Прим. перев.*

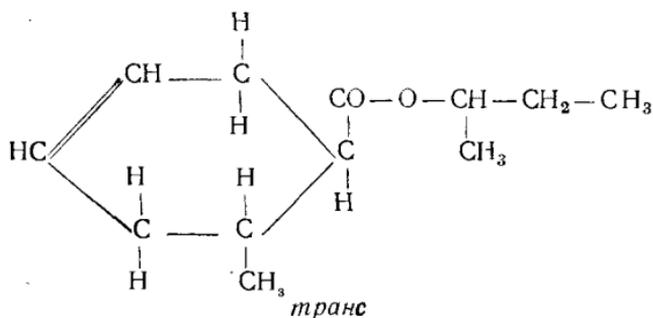
как и анжеликовое масло, но значительно дешевле его, начали производить в больших количествах. Это соединение получило название сиглур; строение его таково:



Затем синтезировали свыше тридцати вариантов этой структуры (усилиями ученых нескольких лабораторий Министерства сельского хозяйства США), причем около четверти всех полученных веществ также, хотя и в разной степени, обладали привлекающим действием. Пригодная для практического применения химическая приманка должна быть не только эффективной, но и не очень летучей, в противном случае она слишком быстро испаряется из ловушек. Кроме того, приманка должна быть дешевой. Варианты сиглура, отличавшиеся от него строением боковой цепи, идущей после кислородного мостика, иногда были для мух привлекательнее своего родоначальника, но тем не менее уступали ему по летучести и стойкости.

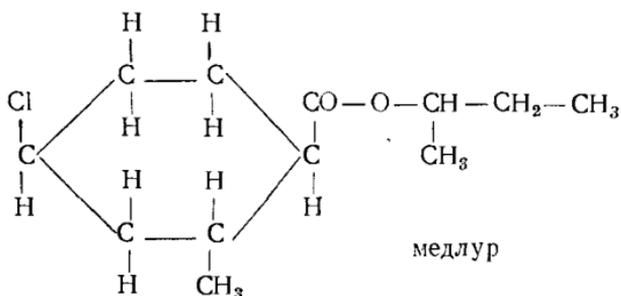
Первые партии препарата сиглур, выпущенные для продажи, принесли некоторое разочарование, так как оказались гораздо менее активными, чем лабораторные образцы. При выяснении причин обнаружилось несколько способов расположения в пространстве отдельных частей молекулы, как и в случае с ранее упоминавшимся бомбиколом. Для того чтобы нагляднее представить себе это изобразим строение молекулы сиглура. Группы, соединенные с кольцом, могут лежать по одну сторону плоскости кольца (случай, который называют *цис*-конфигурацией) либо по разные стороны от нее (*транс*-конфигурация)





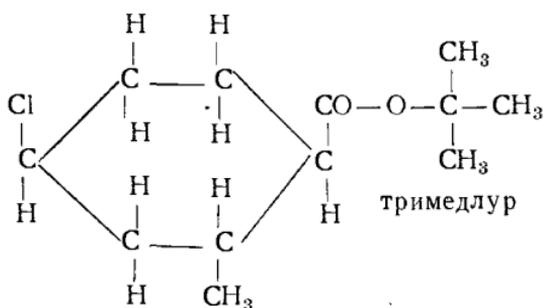
Эти две формы (изомеры) были получены синтетически и испытаны как приманки. При этом оказалось, что биологической активностью обладает лишь *транс*-форма, тогда как *цис*-изомер совершенно не привлекает самцов средиземноморской плодовой мухи. А первые партии вещества, выпущенного промышленностью, содержали частично и вторую, то есть неактивную, форму. Когда в технологию получения синтетической приманки внесли соответствующие изменения, был получен вполне удовлетворительный, хотя и не совсем совершенный продукт.

Его усовершенствование повели по пути изменения циклической части молекулы, которую модифицировали введением атомов водорода и хлора (или брома) по месту двойной связи. Так был получен новый продукт — медлур, оказавшийся более эффективной и стойкой приманкой, чем его предшественник — сиглур. Если принять во внимание, что атом хлора (или брома) может оказаться присоединенным к любому из двух атомов углерода, между которыми в сиглуре была двойная связь, а также что атом хлора (или брома) может занять положение «над» или «под» циклом, возможны по крайней мере четыре *транс*-конфигурации медлура, одна из которых представлена следующей схемой:

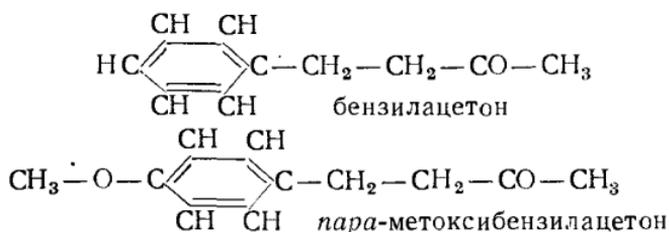


(Вы можете попытаться сами изобразить строение трех других *транс*-изомеров и соответствующих им четырех *цис*-изомеров.) Какой именно изомер является активным началом медлур, выпускаемого промышленностью, не известно; возможно, что этот продукт представляет смесь изомеров.

И снова повторилась игра с варьированием правой части молекулы (после кислородного мостика —O—), в результате чего было получено сорок шесть новых соединений. Одно из них оказалось настолько превосходящим медлур по привлекающей способности (но не по стойкости), что также получило специальное название — тримедлур. Различие между структурами медлур и тримедлур незначительно, что хорошо видно при сравнении их структур.

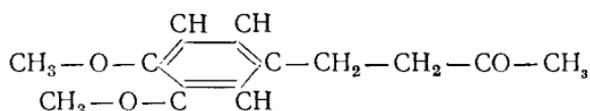


Другой вредитель, также приносящий значительные убытки, — дынная муха (*Dacus cucurbitae*), обнаруженная на Гавайских островах и в некоторых других местах. В начальных исследованиях, подобных тем, которые привели к открытию сиглур и медлугов, было испытано более тысячи разнообразных химических соединений на их способность приманивать самцов дынной мухи; некоторые из этих соединений оказались эффективными. Ниже приведены формулы двух наиболее активных веществ:

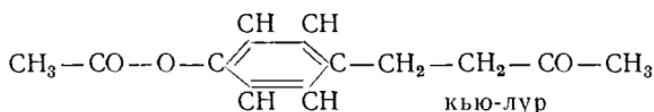


Уже известным нам способом проводились изменения этих структур на все лады (было испытано свыше трех ты-

сяч соединений). Наряду с положительными были получены и довольно озадачивающие результаты. Так, например, соединение, похожее на *пара*-метоксибензилацетон, совсем не привлекало самцов дынной мухи (его формула приводится ниже).

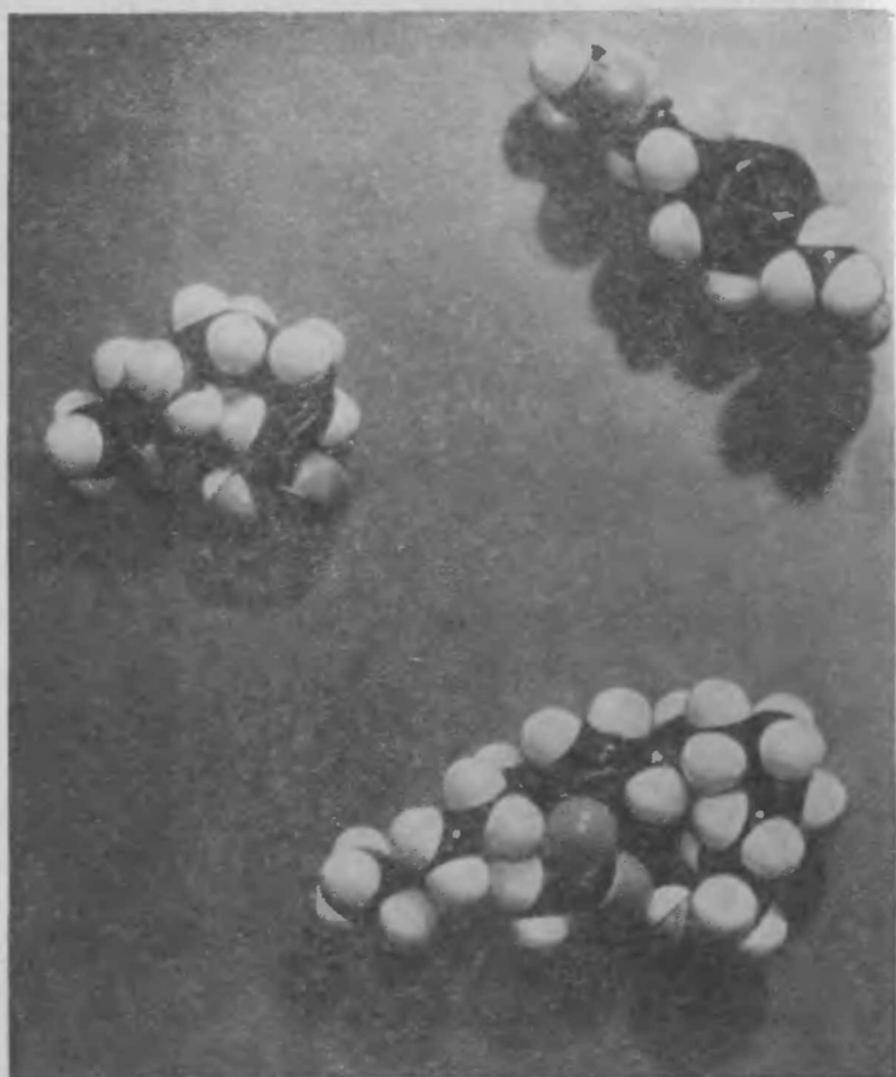


С другой стороны, второе близкое по строению соединение оказалось столь эффективной приманкой, что получило название кью-лур (фиг. 8). Вот его формула:



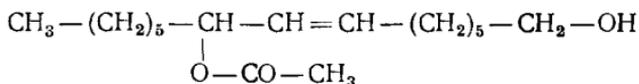
Еще не известно, почему столь малые изменения в структуре приводят к таким резким изменениям биологической активности этих соединений. Пока что это относится к числу нерешенных задач, причем вероятность того, что эти вещества, по-видимому, никоим образом не повторяют действительного строения природного полового аттрактанта дынной мухи, делает их еще более загадочными. С практической точки зрения это, как уже говорилось, не имеет значения, но с позиций глубокого познания химии природных половых аттрактантов было бы интересно узнать то общее в их структуре, что придает им столь высокую активность.

В последние годы был успешно изучен еще один аттрактант — для непарного шелкопряда (*Porthetria dispar*). Известно, что самцы непарного шелкопряда (для опытов их метили) находят самок на расстоянии свыше трех километров, так что «приманка», выделяемая самками, очевидно, чрезвычайно сильна. Как и в случаях с медлуrom и кью-луром, эта задача исследовалась группой ученых Министерства сельского хозяйства США, а также некоторыми другими лабораториями. Отрезанные кончики брюшек нескольких сот тысяч самок непарного шелкопряда подвергали экстракции, а затем поступали с экстрактом так же, как с экстрактом из самок тутового шелко-



Ф и г. 8. Примерные модели молекул трех веществ, привлекающих насекомых. Слева: природный аттрактант пчелиной матки. Вверху: синтетический аттрактант кью-лур, используемый для привлечения дынной мухи. Внизу: гиплур, синтетический аналог природного аттрактанта непарного шелкопряда.

пряда (см. главу 5). В конечном итоге было получено вещество (*цис*-форма), являющееся природным половым аттрактантом:

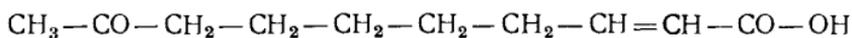


Как только это было выяснено, оказалось, что очень близкое соединение можно легко синтезировать из вполне доступного сырья (так называемой рицинолевой кислоты, которую в свою очередь получают из касторового масла). Этот заменитель отличается от природного соединения тем, что его цепь (в правой части) имеет на две метиленовые ($-\text{CH}_2-$) группы больше. Действительно, синтезированное вещество, как было обнаружено, обладало даже большей эффективностью, чем его природный предшественник. Так, в полевых условиях уже 10 пикограммов привлекало в ловушки большое число самцов непарного шелкопряда, а в лабораторных биопробах были активны уже поистине ничтожные количества этой приманки — миллионные доли пикограмма. Этот синтетический вариант получил название гиплур (см. фиг. 8).

Благодаря наличию двойной связи в молекуле природного аттрактанта и синтетического гиплура оба они могут существовать в *цис*- и в *транс*-формах. Было показано, что активностью обладает только *цис*-изомер. Если же цепь еще более удлинить, например ввести в ее правую часть еще две метиленовые группы, то способность привлекать насекомых значительно уменьшается; эффективность снижается также, если боковую цепь молекулы заменить на радикалы $-\text{O}-\text{CO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ или $-\text{O}-\text{CO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$. И в этом случае мы опять не знаем причин, оказывающих влияние на активность.

Одной из самых последних расшифровок половых аттрактантов насекомых является химическая идентификация привлекающего компонента запаха матки медоносной пчелы (*Apis mellifera*). В отличие от самки непарного шелкопряда, которая не умеет летать и должна ждать прилета самца, пчелиная матка совершает брачный полет и встречается с трутнем высоко в воздухе. «Технические проблемы», которые должна разрешить эта пара довольно мелких насекомых, свободно передвигающихся в пространстве и приближающихся друг к другу с расстояния до ки-

лометра, вполне можно сравнить с теми, которые возникают при встрече двух астронавтов в космическом пространстве. Тем не менее эти проблемы разрешаются в рассматриваемом случае с помощью привлекающего запаха. Сейчас уже показано, что основным компонентом, если вообще не единственной составной частью, этого запаха является соединение следующего строения (см. фиг. 8):



Биологические испытания в этом случае оказались чрезвычайно сложным делом, так как трутень не обращает на матку никакого внимания, если она находится ниже четырех с половиной метров над землей. Поэтому опыты пришлось проводить на большой высоте. Для удерживания маток (привязанных нейлоновыми нитями) или кусочков фильтровальной бумаги, пропитанных испытуемыми соединениями, использовались надувные шары. За трутнями следили с земли при помощи бинокля.

Этот аттрактант несколько необычен: он выделяется в ротовых частях пчелиной матки, имеющей чрезвычайно большие челюстные железы.

Природные половые аттрактанты или их синтетические заменители типа медлора имеют огромное потенциальное значение вследствие исключительно высокой специфичности, которая проистекает из их естественной роли, заключающейся в привлечении к самкам строго определенного вида самцов. Это свойство аттрактантов можно использовать для обследования и выяснения зараженности любого района; кроме того, — и это особенно важно — смесь их с ядами позволит избирательно уничтожить только один вид вредных насекомых. С помощью этих веществ многих полезных насекомых, таких, например, как медоносные пчелы, можно избавить от неминуемой гибели при распылении ядохимикатов.

Совсем недавно были обнаружены еще более интересные возможности применения аттрактантов. Оказалось, что некоторые вещества обладают способностью делать насекомых бесплодными, не убивая их. Если, используя половой аттрактант для привлечения самцов, обработать их стерилизующим агентом, а затем выпустить на свободу, каждый из таких самцов, встретив самку, в биологическом смысле «убьет» ее, ибо каждый индивид, не воспроизводящий себя, равносителен мертвецу. Эти «хемостерильянты»

являются, по-видимому, очень сильными соединениями; они даже превосходят по эффективности многие обычные инсектициды, причем нет никакой необходимости распылять их. Если научиться использовать «хемостериланты» вместе с видоспецифичными аттрактантами (как правило, но совсем не обязательно с половыми), можно сделать их гораздо более безопасными, применяя вдали от тех видов насекомых, которые следует оберегать.

Разработка этих сильных и высокоспецифичных приманок, каким бы странным это ни показалось на первый взгляд, несколько задерживается именно из-за их высокой эффективности. Дело в том, что уже очень небольшие количества этих веществ удовлетворяют всю потребность в них. Так, например, Министерство сельского хозяйства США использует в год лишь около 450 кг аттрактантов средиземноморской плодовой мухи и около 45 кг синтетической приманки для непарного шелкопряда, причем этого количества достаточно для зарядки 30 000 ловушек. Это означает, что рынок сбыта этих химических препаратов весьма незначителен, вследствие чего химические компании крайне неохотно идут на крупные расходы, необходимые для исследований и разработки веществ, потребности в которых измеряются не тоннами и не цистернами. Именно поэтому большинство таких исследований производится в правительственных или университетских лабораториях, где «чистая наука» не только существует, но даже поощряется.

Я думаю, что положение довольно быстро изменится, когда мы научимся рассматривать эти соединения в первую очередь как опознавательные сигналы и лишь во вторую — как средства привлечения насекомых. А когда мы дойдем до этого, смогут обнаружиться новые возможности использования аттрактантов.

Распыляя вещества с опознавательным запахом (или хорошие имитации их) столь же широко, как сейчас — инсектициды, мы, возможно, сумеем нейтрализовать чувствительный аппарат определенных насекомых, так что они не смогут ни находить, ни опознавать своих партнеров, а их нормальные реакции станут настолько спутанными и перестимулированными, что эти насекомые утратят способность к спариванию. На языке теории информации «отношение шум/сигнал» возрастет настолько, что будет нарушена эффективная связь между полами. Такой

метод использования этих химикалиев имел бы преимущество: специфичность их по отношению к нужному в данный период виду насекомых и отсутствие токсичности веществ, используемых для борьбы с вредными насекомыми, что особенно важно с точки зрения существующей в настоящее время опасности заражения территории стойкими инсектицидами.

Благодаря своей высокой биологической активности такие вещества могли бы применяться для «насыщения» зараженного пространства в количествах, ни в коей мере не опасных, но достаточных для обеспечения массового сбыта этих веществ, что, несомненно, заинтересовало бы химические компании-изготовители.

Недавно ученые Университета штата Висконсин проделали весьма интересный и наглядный опыт. В проволочные ловушки с липким покрытием посадили в качестве приманки по одной самке соснового пилильщика (*Diprion similis*). В некоторые ловушки самцы вообще не попали, — возможно, потому, что самки даже и не пытались их привлечь. Однако восемь ловушек собрали в среднем по тысяче самцов каждая (минимум 542 и максимум 1706), а одна особенно очаровательная самка собрала 11 000 самцов за восемь дней, причем три последних дня она была мертва!

Насколько чувствителен нос?

Нередко вещества, обладающие очень сильным запахом для насекомых, с нашей точки зрения пахнут весьма слабо. Это дает основание думать, что у насекомых обоняние тоньше, чем у людей. Такая мысль была бы правильной только в том случае, если бы обоняние всех животных было «настроено» на одни и те же вещества. На самом деле чувствительность человеческого носа не столь уж ничтожна. Разумеется, если с ним небрежно обращаться, не считаться с тем, что он может испортиться, если, наконец, он прокопчен табачным дымом, оглушен «благоуханием» бензина или разъеден различными химикалиями, от него вряд ли можно многого ожидать. Профессиональный нос, однако, творит чудеса, если он принадлежит парфюмеру, или дегустатору, или, например, дикарю, который, выслеживая дичь, полагается на свой нос не меньше, чем на глаза. У слепых ощущение запаха бывает порой настолько сильно развито, что служит прекрасным дополнением к слуху и осязанию, и странно, что медики не уделяют должного внимания развитию у них обоняния.

Чтобы ощутить запах, мы должны вдохнуть через нос пахнувший воздух, а для закрепления ощущения — активно и многократно повторить эту операцию. Чувствительная к запаху область расположена в верхней части носового хода, в так называемой обонятельной щели, и при обычном дыхании большая часть вдыхаемого воздуха минует ее. Наименьшая концентрация пахучего вещества, вызывающая ощущение запаха, известна в науке как пороговая концентрация. Ее можно выразить различными способами: в граммах пахучего вещества на литр или — иногда — числом молекул этого вещества в 50 куб. см воздуха, который, как считают, идет на один «нюх».

Измерения порога проводили различными способами и с различной степенью точности. Одна из таких систем, разработанная и широко используемая Эдсбергом, получила название метода вдувания.

По этой методике воздух, содержащий в определенной концентрации пахучее вещество, с помощью пульве-

ризатора вдувают непосредственно в обонятельную щель. Это, разумеется, совершенно неестественный, даже противоестественный метод, и для его осуществления необходимо, чтобы подопытные были очень терпеливы и общительны. Другой, альтернативный способ — это обычное «нюханье»; такой способ, вероятно, предпочтительнее, хотя при использовании его труднее соблюдать количественный контроль.

Используя метод простого «нюханья», Нейхаус измерил порог чувствительности для ряда химических соединений у человека и у собаки. Ниже приведены некоторые полученные им данные.

*Пороговая концентрация
(число молекул в куб. см воздуха)*

<i>Вещество</i>	<i>Собака</i>	<i>Человек</i>
Уксусная кислота	2×10^5	5×10^{13}
Масляная кислота	9×10^3	7×10^9
Этилмеркаптан	2×10^5	4×10^8
Альфа-ионон ¹	1×10^5	3×10^8

Здесь приведены средние значения пороговой чувствительности, но следует учитывать, что всегда существуют значительные отклонения для отдельных подопытных, будь то люди или собаки. Так, например, в группе из двенадцати собак (десять немецких овчарок, один ротвейлер и один ховаварт) порог варьировал от $1,7 \times 10^3$ до 12×10^3 молекул на кубический сантиметр воздуха. Согласно результатам, полученным Нейхаусом, запахи можно разделить на две основные группы: запахи типа уксусной и масляной кислот, которые собака чувствует в концентрациях в миллион раз меньших, чем мы, и запахи типа меркаптана и ионона, для которых порог чувствительности у собаки только в тысячу раз выше нашего. Быть может, чувствительность собаки, в миллион раз превышающая человеческую, объясняется ее естественной приспособленностью к улавливанию запахов, которые мы не воспринимаем. А в случае, когда чувствительность отличается только в тысячу раз, можно предполагать, что человек и собака имеют сходные рецепторы, но пахучие молекулы легче достигают рецепторов

¹ α - и β -иононы представляют собой широко известные душистые вещества, используемые в парфюмерной и пищевой промышленности.— *Прим. перев.*

собаки, чем человека. Совсем недавно де Врис и Стювер пытались установить абсолютную чувствительность человеческого носа. В работе с пороговыми концентрациями они подсчитали, какая часть из предполагаемых 50 кубических сантиметров воздуха, втягиваемая носом за один вдох, действительно попадает в него и проходит через обонятельную щель. Зная этот объем воздуха, они смогли определить, какое число молекул достигает окончаний обонятельного нерва.

По их подсчетам, для возникновения импульса на каждое нервное окончание должно приходиться до восьми молекул пахучего вещества. А для того, чтобы возникло ощущение запаха, необходимо совместное действие около 40 нервных окончаний. Поскольку маловероятно, чтобы у собак дело обстояло принципиально иначе, эти ученые сделали вывод, что наша чувствительность не ниже, чем у собак. Однако собаки, безусловно, превосходят нас в способности воспринимать гораздо более широкий спектр запахов; кроме того, строение их носа таково, что воздух имеет более свободный доступ к чувствительным окончаниям, а мозг лучше приспособлен к фиксированию, запоминанию и истолкованию «пахучей информации», которую ему предоставляет нос.

Раз уж речь зашла о пороговых концентрациях, давайте посмотрим, что в этом плане известно о возможностях других животных.

Вопрос о насекомых мы уже рассматривали, причем ясно, что по отношению к воспринимаемым ими запахам их чувствительность приблизительно такая же, как у собаки или у человека.

Гофф изучал пороговую чувствительность крыс довольно интересным способом. Он научил их в ответ на ощущение запаха нажимать на впускной клапан в ингаляционной камере, а затем снижал интенсивность запаха до тех пор, пока крысы не переставали правильно реагировать на него. Таким путем Гофф нашел, что пороговая концентрация для такого соединения, как пентан, составляла у крыс 1×10^8 молекул в 1 куб. см воздуха.

Линдемани, изучив способность ежей (*Erinaceus europaeus*) реагировать на различные запахи, выяснил, что они могут обнаруживать присутствие съедобного жука на расстоянии одного метра, а приближение врага (например, собаки) — девяти метров.

Обычно считают, что у птиц обоняние развито сравнительно плохо, но в действительности этим просто очень мало занимались. Колибри, например, в поисках цветов, по-видимому, полностью полагаются на зрение. Известно, что Михельсен приучил самцов белых голубей Карно различать запах таких веществ, как *втор*-бутилацетат и изооктан. Другой ученый, Банг, показал, проведя анатомические исследования, что по крайней мере три вида птиц имеют хорошо развитые органы обоняния, а Овре и Нортингтон подтвердили это, изучая поведение птиц одного из них — индюшачьего грифа *Cathartes aura* (L.), который питается падалью. Экспериментаторы показали, например, что эти птицы могут находить мясо, спрятанное под слоем листьев. Вероятно, животным, питающимся падалью, вроде грифов, обоняние необходимо в гораздо большей степени, чем колибри. Однако в целом птичьим обонянием пока, к сожалению, пренебрегают.

Рыбам в этом смысле уделяют значительно больше внимания. Это, видимо, связано с замечательной способностью отдельных видов рыб находить обратный путь в ту реку, где они родились.

Двум американским ученым выдали патент на использование фенилацетата калия для отпугивания (без отравления) рыб. Это достигалось добавлением фенилацетата в воду в ничтожных концентрациях (одна часть в десяти триллионах частей воды, то есть 1 : 10¹³).

Д. М. Стивенс, изучая некоторых вест-индских рыб, обнаружил, что они реагируют на водный экстракт из тканей млекопитающих или живого планктона в разведении 1 : 10⁹. Этими веществами оказались, в частности, креатинин, молочная кислота и глутаминовая кислота:



(Глутаминовая кислота представляет собой активную основу хорошо известного глутамината натрия, используемого в качестве пищевой приправы.)

Даже после того, как Стивенс ослепил рыб, они продолжали реагировать на приманку. Это еще одно свидетельство, что рыбы пользуются обонянием при поисках пищи в темноте или в очень мутной воде.

Очень хорошо развито обоняние у угрей (*Anguilla anguilla* (L.)), чьи удивительные миграции заставляют нас поговорить о них отдельно. Тейхманн обучал европейских угрей различать синтетические запахи β -фенилэтилового спирта (нами он воспринимается как запах розы) и α -иона (запах фиалки). Пороговая концентрация для фенилэтилового спирта оказалась равной $1 : 3 \times 10^{18}$ частей воды, а для иона — $1 : 3 \times 10^{14}$ частей воды. На основании этих результатов автор пришел к заключению, что по чувствительности обоняния угорь не уступает собаке.

Пороговые концентрации — это такие концентрации пахучего вещества в среде, ниже которых запах не ощущается. При концентрации выше пороговой сила запаха, естественно, нарастает, однако это трудно измерить, так как весьма сложно дать количественную оценку силе наших чувств или ощущений. В этом случае нам помогает так называемый закон Вебера—Фехнера, который в общем виде с некоторыми ограничениями приложим к оценке разного рода физических ощущений.

Предположите, что вам показывают несколько бумажных пакетов, заполненных различными количествами песка, и просят выбрать из них те, которые весят столько же, сколько предложенный контрольный пакет. Вы должны это проделать, по очереди поднимая эти пакеты, без каких-либо средств взвешивания. Если после этого вы взвесите пакеты, то обнаружите, что ваш выбор был не совсем точным. Так, например, контрольный пакет весит 16 г, а вес выбранных вами пакетов колеблется в пределах от 15 до 17 г. В таком случае вы можете сказать, что для контрольного веса 16 г минимально заметное различие составляет 1 г, а их отношение равно $1/16$. Если затем вы повторите этот эксперимент с контрольным пакетом, весящим 16 кг вместо 16 г, вы обнаружите, что эта минимально заметная разница составит 1 кг, то есть отношение $1/16$ сохранится. Если это повторить с контрольным весом 32 кг, разница составит 2 кг и т. д.

Точно так же, если вы стоите в темноте около дома и смотрите на два окна, одно из которых освещено 1000 свечей, а другое — иным количеством, то вы можете сказать,

сколько свечей следует прибавить или отнять, чтобы уравнять освещенность обоих окон, то есть можете снова определить эту минимально заметную разницу, выраженную в свечах. Предположим, что требуемое количество равно 80 свечам; тогда, если бы число свечей в контрольной комнате было равно 100 вместо 1000, минимально заметное различие составило бы приблизительно 8 вместо 80.

Это же правило выдерживается для интенсивности звука, чувства вкуса и многих других ощущений. Вообще говоря, если x представляет собой силу раздражителя, измеренную в соответствующих единицах (граммах, свечах или частях на миллион), а Δx — тот минимум этих единиц, на который нужно увеличить x , чтобы достичь ощущения минимального различия, тогда $\Delta x/x$ величина постоянная¹.

Это обобщение было предложено Вебером более 100 лет назад. Фехнер, которого часто называют отцом психофизики, развил его следующим образом. Если $\Delta x/x = \text{const}$ для минимально ощутимого различия, это должно быть справедливо и для других приращений величины данного раздражителя, что математически можно записать так:

$$dS = C \frac{dx}{x},$$

где dS представляет прирост ощущения, вызванный усилением раздражителя dx , действие которого наложилось на действие уже существовавшего раздражителя x , а C — коэффициент пропорциональности.

Математика — это количественная логика, и, раз уж мы выразили математически какую-то идею, обычные преобразования позволяют нам логически развить количественные следствия нашей идеи. Не вдаваясь в подробности этих математических преобразований, скажем лишь, что если

$$dS = C \frac{dx}{x},$$

то

$$S = a \log x - a \log x_0,$$

¹ Δx обозначают величину так называемого разностного, или дифференциального, порога ощущения. — *Прим. перев.*

где S — сила ощущения (измеренная тем или иным способом); $\log x$ — логарифм силы (энергии, концентрации и т. д.) раздражителя, вызывающего данное ощущение S ; $\log x_0$ — логарифм силы раздражителя, вызывающего пороговое ощущение, а a — константа.

Именно это логарифмическое отношение между силой раздражителя и силой ощущения называют законом Вебера—Фехнера (или Фехнера—Вебера). Главное в этом законе то, что он показывает возможность постановки эксперимента несколько иного типа. (В первом эксперименте было просто показано, что $\Delta x/x = \text{const}$ для минимально ощутимого различия.) Если эта формула верна, тогда в соответствии с основами математики графическое изображение зависимости ощущения S от логарифма силы раздражителя x должно представлять собой прямую линию.

Прежде чем мы увидим, каким образом эти закономерности применимы к запахам, следует обратить внимание еще на одно обстоятельство. Когда концентрация пахнущего материала равна нулю, ощущение запаха тоже, естественно, равно нулю. Нулевое значение ощущения сохранится до тех пор, пока значение концентрации, возрастая, не достигнет порогового (x_0) и несколько не превысит его. Поэтому интенсивность ощущения и величина концентрации пахнущего материала различаются тем, что одна из этих величин может быть равна нулю, тогда как другая может иметь в это время отличное от нуля значение.

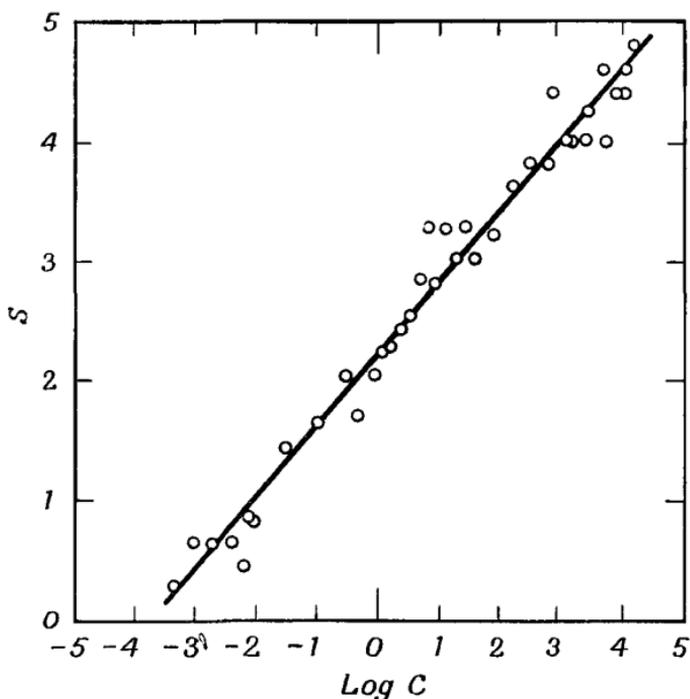
Ученые из Горнорудного бюро США несколько лет назад использовали следующий грубый метод количественной оценки силы запаха. Их интересовало, можно ли посылать аварийный сигнал работающим в угольных шахтах путем добавления сильно пахнущего вещества в вентиляционную систему или к сжатому воздуху, на котором работают пневмобуры. Для этого им нужно было узнать, какое количество пахучего вещества создает ощущение запаха определенной силы.

Сначала они создали прибор для получения смеси воздуха с этилмеркаптаном — веществом, обладающим при добавлении его в воздух сильным и весьма неприятным запахом. Затем шести наблюдателям, участвующим в опыте, было предложено испытать запах этилмеркаптана в различных концентрациях и попытаться оценить силу его по следующей шестибальной системе.

Оценка 0 соответствует полному отсутствию ощущения запаха; оценка 1 — наличию еле ощутимого запаха, на грани восприятия; оценка 5 соответствует очень сильному ощущению запаха, максимальной интенсивности его; однако такой запах должен восприниматься только как запах и не вызывать никаких других физиологических реакций, например раздражения глаз или дыхательных путей, тошноты и т. д. Промежуточные оценки должны были относиться к следующим ощущениям запаха: 3 — отчетливый запах средней силы между 1 и 5; 2 — слабый, воспринимаемый как промежуточный между 1 и 3, и, наконец, аналогично двум предыдущим 4 — сильный, промежуточный между 3 и 5. В соответствии с этой шкалой испытуемые и должны были записать свои оценки интенсивности запаха разных концентраций. Их показания не всегда совпадали, однако при участии в опыте нескольких испытуемых (обычно шести) и последующем вычислении средних значений можно было получить вполне удовлетворительные результаты измерений интенсивности запаха.

Поскольку один из испытуемых был недостаточно «разборчивым» (он почти все запахи оценил одинаково, как 2) и, кроме того, участвовал менее чем в половине экспериментов, при построении общего графика я отбросил его оценки (фиг. 9). Каждый кружок на графике представляет собой среднюю из пяти (иногда четырех) оценок силы запаха. Например, последний кружок (слева внизу), означает, что только один из пяти человек почувствовал запах соответствующей концентрации; в результате среднее значение силы запаха в этом случае составило 0,20. Следующий кружок означает силу запаха 0,60, потому что его почувствовали трое из пяти испытуемых, и т. д.

Полученный график интересен, во-первых, тем, что, несмотря на очень приблизительный метод оценки интенсивности запаха, на нем отчетливо видна линейная зависимость силы ощущения от силы воздействия в соответствии с законом Вебера—Фехнера. Во-вторых, эта зависимость сохраняется в огромном диапазоне концентраций. Если пороговая концентрация для человека в среднем составляет около 1×10^{-3} частей на миллион частей воздуха, то максимальная из испытанных концентраций, дающая ощущение тошноты (5 баллов), составляет 10^4 частей на миллион частей воздуха, то есть она в 10 миллионов раз превышает пороговую концентрацию.



Ф и г. 9. На этом графике представлены результаты экспериментов Фельднера с этилмеркаптаном. S — сила запаха, установленная по шестибалльной шкале, а $\log C$ — логарифм числа частей пахучего вещества на миллион частей воздуха. Это графическое изображение закона Вебера — Фехнера. Использование логарифмического масштаба создает растяжение оси абсцисс для малых концентраций и сжатие для больших. Отрезок шкалы от $\log C = -5$ до $\log C = 5$ соответствует диапазону концентраций от 0,00001 до 100 000 частей на миллион.

Оказывается, наш нос чувствителен не только к громадному числу различных запахов, но и к огромному диапазону их концентраций. При этом небольшие качественные различия в запахах мы улавливаем гораздо лучше, чем небольшие изменения в силе какого-нибудь одного запаха. Из графика видно, например, что концентрацию этилмеркаптана приходится обычно изменять примерно втрое, чтобы достичь минимально ощутимого различия в силе запаха, то есть $\Delta x/x = 1/3$ для минимально ощутимого различия. Это означает, что между верхним и нижним пределами восприятия запаха содержится лишь около 25 или 30 единиц JND.

Таким образом, наши носы представляют собой весьма неважные приборы для количественной оценки силы запаха, однако для качественной работы, если ими пользоваться надлежащим образом, они превосходны. Поэтому было бы ошибкой, экспериментируя с запахами, добиваться сколько-нибудь значительной точности в количественном отношении.

Все это важно учитывать при разрешении таких практических задач, как, например, загрязнение воздуха промышленными предприятиями, распространяющими отвратительные запахи. Если мы просим население охарактеризовать силу запаха, не следует пытаться улавливать в ответах тонкие различия, которые позволили бы делать какие-либо количественные оценки. Для обсуждения подобных вопросов необходимо тщательнейшим образом подбирать слова, если мы хотим избежать несущественных аргументов. Если, например, принять в качестве стандарта следующую терминологию и соответствующую ей шкалу оценок, то мы увидим, что ответы людей редко будут отличаться более чем на единицу:

<i>Сценка</i>	<i>Описание запаха</i>
0	Отсутствует
1	Едва заметный
2	Отчетливый
3	Умеренный
4	Сильный
5	Невыносимый

Эта шкала ничего не говорит о том, приятный это запах или неприятный. Она касается только силы запаха. Слова здесь подобраны таким образом, чтобы можно было избежать неопределенных сравнений типа «очень слабый» или «довольно сильный».

Со всем этим связан, вероятно, самый любопытный из всех интересных фактов, касающихся запаха: ведь почти не существует «бесхарактерных» запахов. Каждый отчетлив, и, что самое замечательное, каждый сохраняет свою отчетливость до самого порога восприятия. Только вблизи пороговой концентрации существует некоторая неопределенность, приводящая к таким замечаниям, как: «... да, я чувствую что-то, но я не уверен...», но, едва только запах усилится, хоть слегка, ответ меняется на вполне

положительный: «... теперь есть, очень слабый, но я могу узнать его».)

Наши глаза не обладают такой способностью распознавать цвета при слабом освещении. Предел цветового восприятия лежит гораздо выше порога восприятия света вообще. Это привело к открытию в сетчатке глаза, или, как ее называют, ретине, двух типов светочувствительных приемников (эти рецепторные клетки за свою форму получили название палочек и колбочек ¹).

Тот факт, что наши носы продолжают различать запахи даже при малых концентрациях пахучего вещества, может рассказать кое-что важное о их работе.

Существует много запахов, характер которых меняется в зависимости от концентрации. Вероятно, в качестве примера лучше всего взять запах скунса; в больших концентрациях он отвратителен, а при сильных разведениях напоминает запах мускуса и может не нравиться уже лишь по ассоциации. (Иначе почему бы мускус считать почти незаменимым ингредиентом при изготовлении самых высококачественных духов да еще придавать его запах большинству сортов туалетного мыла?) Изменение качества с изменением интенсивности не означает полной потери первого. Когда наши глаза видят свет, но не могут определить окраски, — вот это потеря качества. С изменением интенсивности оптическое качество менялось бы только в том случае, если бы свет, красный при одной интенсивности, казался желтым или голубым при другой, а этого, как известно, не бывает.

Изменение качества запаха в зависимости от изменения его силы характерно, по-видимому, для сложных запахов, в состав которых входит несколько пахучих веществ с разными пороговыми концентрациями. По мере уменьшения концентрации отдельные компоненты один за другим выпадают. Тот запах, который остается последним, тоже вполне специфичен, но имеет уже другое качество.

В последние годы закон Вебера — Фехнера проверяли главным образом С. С. Стивенс и его последователи в США.

¹ Колбочки ответственны за «дневное» зрение, при ярком освещении, за различение деталей и цветовое зрение; палочки функционируют преимущественно при слабом освещении, невосприимчивы к цвету, обеспечивают черно-белое «сумеречное» зрение.— *Прим. перев.*

По ряду причин Стивенс исходил из предположения, что лучший способ количественного определения силы какого-либо ощущения состоит в том, чтобы испытуемый, сравнивая его с некоторым стандартом, принятым за единицу, сообщал, какую часть стандарта ($1/2$, $1/3$ и т. д.) составляет это ощущение или во сколько раз (в 2, 3 и т. д.) оно превосходит стандарт. (Много лет назад чего-то подобного хотел добиться Плато, когда просил восьмерых художников изобразить ему серый цвет, занимающий строго среднее положение между белым и черным.) Фельднер делал по-другому: он просил испытуемых представить себе какую-нибудь линейную шкалу, вроде линейки с делениями, и решить, где на этой шкале — хотя бы приблизительно — располагается запах данной силы.

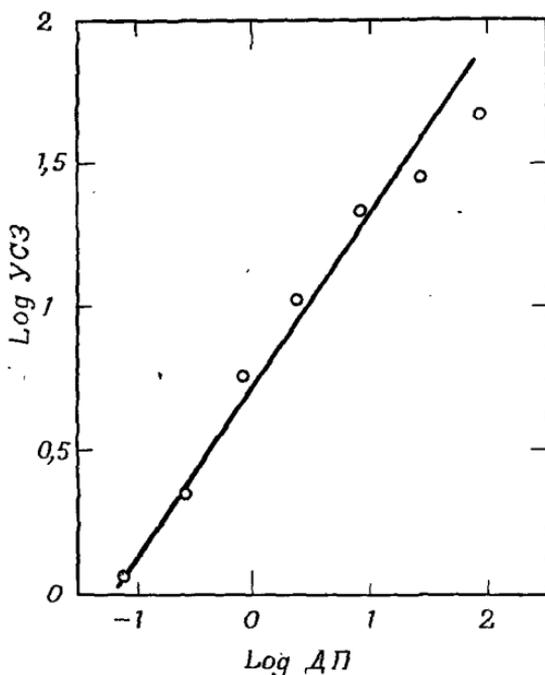
Одним из достоинств метода «установления пропорции» Стивенса было то, что неопределенность в пропорции можно сравнивать с величиной этой пропорции, точно так же как едва заметное изменение в раздражителе можно соотнести с величиной (силой) этого раздражителя.

Чтобы понять это, давайте вернемся к математическому выражению закона Вебера — Фехнера. Там мы имели дело, что весьма существенно, с фиксированным ощущением и меняли величину раздражителя x , чтобы найти, насколько должна измениться величина раздражителя Δx для получения едва заметного отличия в величине ощущения. Используя метод установления пропорции (метод Стивенса), мы можем делать обратное: задать определенное соотношение двух раздражителей и посмотреть, насколько точно воспринимается это соотношение разными людьми. Иначе говоря, в то время как Вебер сравнивал Δx с x , Стивенс сравнивает ΔS с S .

Поскольку два различных оттенка серого цвета, например, сохраняют одну и ту же относительную яркость при слабом и сильном освещении, Стивенс считает, что

$$\frac{\Delta S}{S} = n \frac{\Delta x}{x},$$

где S — ощущение, измеренное методом установления пропорции, x — раздражитель, измеренный в таких физических единицах, как граммы или части на миллион, а n — коэффициент пропорциональности.



Ф и г. 10. Графическое изображение результатов эксперимента Джонса с бензолом по методу Стивенса. Людей, участвовавших в опытах, просили установить силу запаха растворов бензола путем сравнения с силой запаха среднего раствора из стандартной серии, величина которой была принята за 10. Зависимость логарифма установленной силы запаха (log УСЗ) от логарифма величины давления паров (log ДП) бензола представляет собой почти прямую линию.

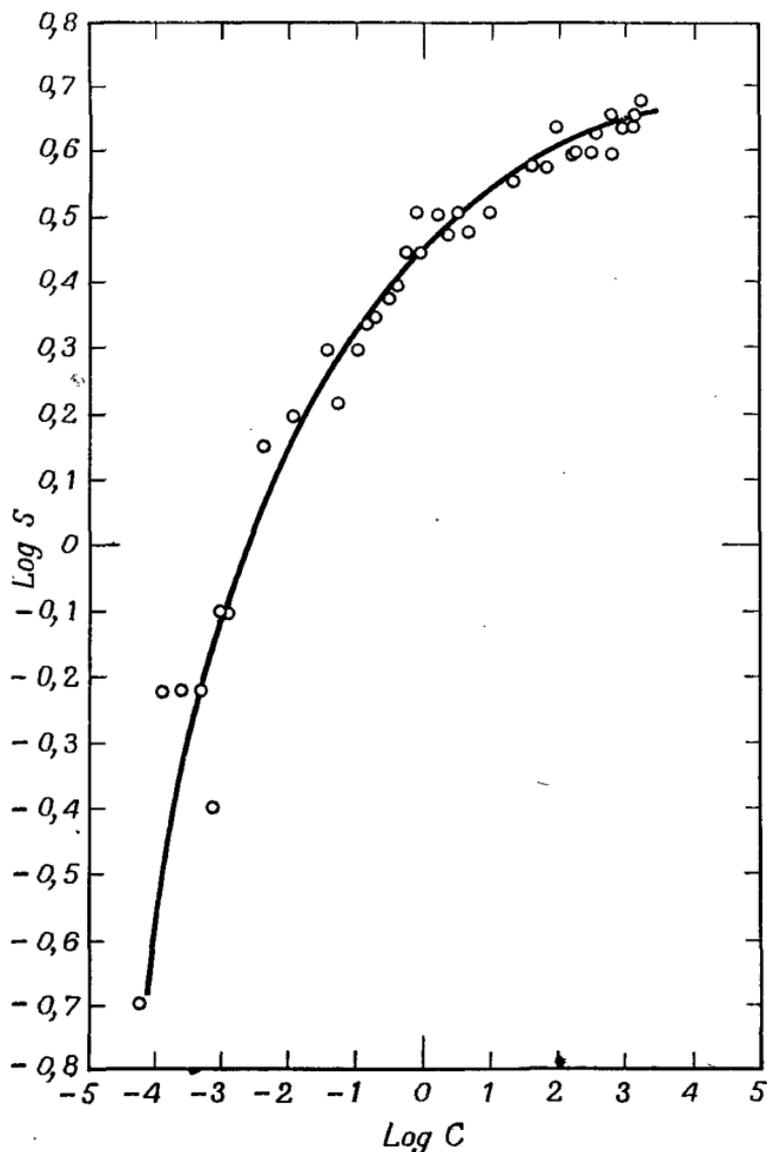
Обычные математические преобразования этого выражения показывают, что

$$S = \left(\frac{x}{x_0} \right)^n,$$

а при логарифмировании правой и левой частей этой формулы получаем

$$\log S = n \log x - n \log x_0,$$

где x_0 — пороговое значение раздражителя.



Ф и г. 11. Графическое изображение результатов эксперимента Фельднера с этилмеркаптаном по методу Стивенса. График представляет собой кривую, поскольку участвовавших в опыте просили установить силу запаха по шестибалльной шкале, а не путем сравнения с каким-то определенным стандартом.

И снова смысл этого математического преобразования заключается в том, что оно определяет постановку эксперимента. Если мы измерим S методом установления пропорции и отложим по одной оси координат величины $\log S$, а по другой — значения $\log x$, то зависимость должна изображаться в виде прямой линии. Это было выполнено Джонсом, который приготовил серию растворов бензола разной концентрации в не имеющем запаха минеральном масле и принял силу запаха образца из середины серии равной 10 единицам. Затем он попросил 36 человек оценить запах всех этих растворов по сравнению с принятым им стандартом и получил вполне воспроизводимые средние величины этих оценок; при нанесении их на график была получена достаточно хорошая прямая (фиг. 10). Джонс проделал аналогичные опыты с рядом других пахучих веществ, но ни одно из выбранных им соединений, к сожалению, не имело достаточно низкого порога, так что он не смог охватить миллионкратного диапазона концентраций, как это сделал Фельднер.

Различие в графиках, построенных по Веберу—Фехнеру и соответственно Стивенсу, состоит в том, что в первом случае строят зависимость S от $\log x$, а во втором — зависимость $\log S$ от $\log x$. Что это не одно и то же, можно увидеть, если взять данные Фельднера для этилмеркаптана (которые дают очень хорошую прямую по Веберу) и использовать их для построения графика по методу Стивенса (фиг. 11). В этом случае график, представляющий собой выраженную кривую, свидетельствует о том, что эти два метода действительно различны. Кривая, полученная из данных Фельднера в координатах Стивенса, отнюдь не доказывает неправильности формулы Стивенса, так как Фельднер не просил своих испытуемых установить пропорцию силы запаха. (Это еще раз показывает, насколько тщательно нужно формулировать вопросы не только в психологических экспериментах, но и во всех экспериментах, связанных с ощущениями.) Далее мы увидим, что способ оценки и измерения силы ощущений Стивенса предполагает постановку некоторых экспериментов, возможность и необходимость которых мы даже не представляли. Кроме того, эти данные пригодятся нам, когда мы начнем думать о запахе как о способе передачи информации.

Рыбы

В апреле 1958 г. несколько тысяч мальков американского лосося (*Salmo gairdnerii*) длиной от 15 до 20 см были выпущены рыбопроизводным хозяйством на реке Элси (побережье штата Орегон, США). Перед тем как выпустить, рыб поместили, отрезав у них особым образом плавники, без которых они вполне могли обойтись. Пять месяцев спустя, 5 сентября 1958 г., одна из этих рыб была выловлена сетью вблизи побережья Аляски, то есть на расстоянии 3200 км от места выпуска. Длина рыбы увеличилась до 35 см. Ее вновь поместили, на этот раз меткой с номером, и выпустили в море. Через семнадцать месяцев (5 февраля 1960 г.) эта рыбка-путешественница, теперь уже более 60 см в длину, вернулась в рыбопроизводное хозяйство на Элси, где она родилась около двух лет назад.

За двадцать лет до этого аналогичный эксперимент провели на противоположном побережье Северной Америки. В 1938 г. Хантсман поместил 31 359 мальков семги (*Salmo salar*), перед тем как выпустить их в Северо-восточную Маргари — реку на острове Кейп-Бретон (Новая Шотландия). 17 июня 1940 г. одна из этих рыб была поймана, помечена и вновь выпущена в Бонависте (Ньюфаундленд), а еще через три месяца — 21 сентября 1940 г. — выловлена на крючок на реке Маргари на расстоянии 3 км от места первого выпуска и 910 км (по кратчайшему пути — морем) от Бонависты.

Уже очень давно было известно, что семга (*Salmo salar*), американский лосось, или «лососевый таймень» (*Salmo gairdnerii*), и различные виды тихоокеанского лосося (кижуч, нерка и т. п.), которые мечут икру в прохладной и чистой воде рек с сильным и быстрым течением, уходят на несколько лет (от 2 до 7, у каждого вида по-разному) в море, а потом снова возвращаются в родные места откладывать икру. В экспериментах, проведенных с этими рыбами, особенно важным оказалось то обстоятельство, что рыб переписывали и метили до того, как они покидали родную реку, потом вновь метили и регистрировали далеко в океане и,

наконец, отмечали в третий раз, когда они возвращались домой. Если бы не эти меры, нельзя было бы считать наверняка, что та рыба, которая вновь вернулась в родную реку, уходила за пределы эстуария¹, в море.

Других рыб метили в открытом море, а позднее вылавливали в реках во время нереста за тысячу и более километров от этого места. В таких случаях нельзя было бы с уверенностью говорить о возвращении рыб, однако опыты неопровержимо доказывали большую вероятность именно возвращения. В одном из таких экспериментов 469 326 мальков нерки (*Oncorhynchus nerka*) пометили, до того как они покинули нерестилища озера Калтус (Британская Колумбия), расположенного на притоке реки Фрэзер. По ходу наблюдений 16 553 экземпляра из помеченных рыб были выловлены уже в зрелом возрасте, причем 4995 — в том же озере Калтус, а 11 558 — в его окрестностях. Хотя при этом ловушки ставили и в других притоках Фрэзера, практически ни одна из помеченных рыб в эти ловушки не попала.

Не все эксперименты дали такие ясные и точные результаты. Бывали и заблудившиеся рыбы. Но и возвращающееся большинство, и заблудившееся меньшинство совершенно необходимы, так как обеспечивают биологическое выживание вида.

В одной из предшествующих глав я объяснял биологическое преимущество насекомого, заботливо выбирающего место для откладывания яиц. Это преимущество остается в силе и для рыб. Если рыба выросла и готова к метанию икры, значит, ей удалось преодолеть все опасности ненадежного и враждебного мира. Первый шаг к выживанию был сделан, когда рыба появилась на свет при благоприятных условиях; поэтому, если она сможет выметать икру в точно такой же среде, условия развития потомства окажутся, возможно, не наилучшими, но зато наверняка подходящими. В то же время в этом процессе желателен какой-то процент «блуждающих» рыб, чтобы время от времени образовывать новые косяки, направляющиеся в новые реки. Это может оказаться необходимым в том случае, если путь к родной реке будет закрыт из-за оползня, или обвала, или какого-то искусственного препятствия, например плотины гидроэлектростанции.

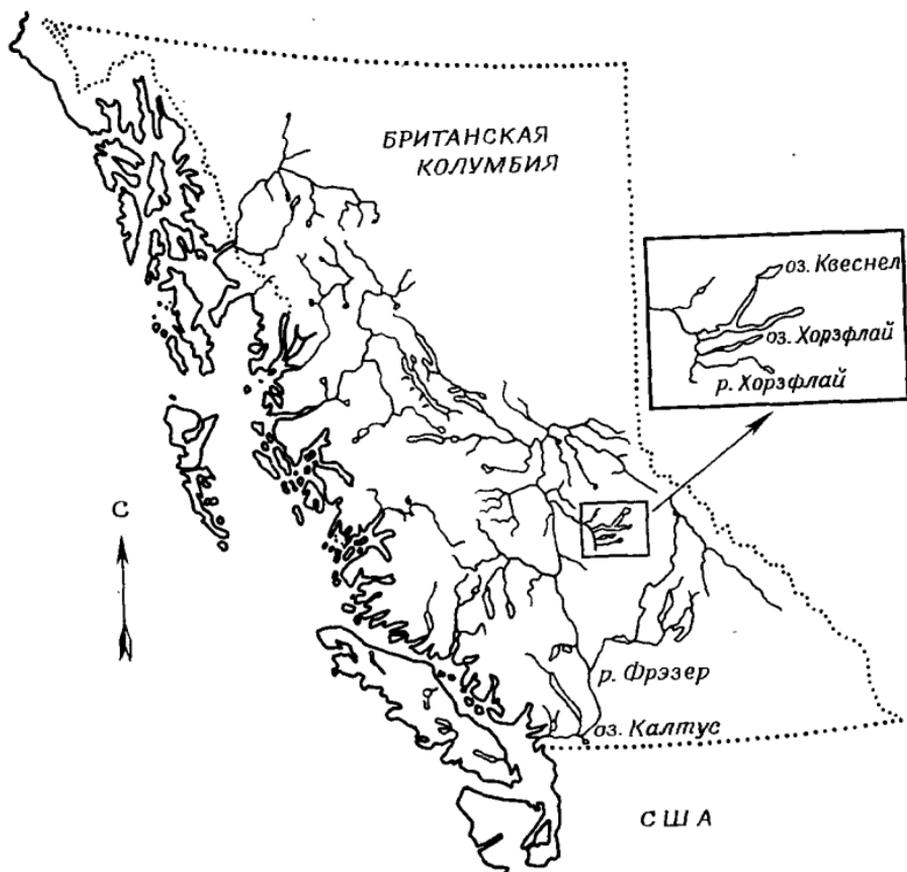
¹ Эстуарий — широкое устье реки, доступное для приливов.

На западном берегу Северной Америки каждая река и часто даже каждый приток, по-видимому, имеет собственное «стадо» лосося, количественный состав которого можно довольно точно предсказать на основании систематических наблюдений. Если косяк или часть его не возвращалась на родину из-за каких-то геологических или гидрологических препятствий, позднее где-нибудь в другом месте всегда удавалось обнаружить новую, ранее не зарегистрированную стаю рыб, которая, по-видимому, и была отбившейся частью старого косяка.

Возвращение рыб в родные реки не является их врожденным (то есть генетически predetermined) свойством. В противном случае потомство «заблудившихся» рыб продолжало бы возвращаться в «родовую» реку и никаких новых маршрутов не образовалось бы.

Обычно мальки выводятся из икры на том же месте, где эта икра была отложена, однако вовсе не обязательно, чтобы эти два места совпадали. Давайте посмотрим, что получилось в результате одного научного эксперимента (фиг. 12). В 1949 г. на нерестилищах реки Хорзфлай в Британской Колумбии было собрано большое количество икры нерки (*Oncorhynchus nerka*). Эту икру переправили в баках в рыбный инкубатор на озеро Хорзфлай, где из нее вывелись мальки, которые провели там первый год своей жизни. Река Хорзфлай и озеро Хорзфлай находятся по разные стороны горного водораздела, так что икра была отложена в воде одного района, а развивалась в воде другого. В 1950 г. 94 000 мальков из этой икры отправили на самолете в устье реки Хорзфлай, туда, где она впадает в озеро Квеснел, и выпустили там, пометив предварительно 64 500 мальков. Оттуда рыба могла скатиться в море обычным путем.

В 1952 г., когда хотя бы некоторые из этих рыб, достигших уже трехлетнего возраста, должны были вернуться, за нерестилищами на реке Хорзфлай был установлен тщательный надзор. Из 6829 зарегистрированных трехлетних нерок 2228 были обследованы с целью обнаружить метку инкубатора. Однако ни одна из обследованных рыб метки не имела. С другой стороны, в районе инкубатора было поймано тринадцать трехлетних нерок, девять из которых оказались мечеными. Интересно, что ранее в этих местах нерка не попадалась.



Ф и г. 12. На этой карте Британской Колумбии показаны реки и протоки, в которые заходят лососи. Реки северо-восточного района этой местности впадают в Ледовитый океан; реки юго-восточного района с нерестилищами отрезаны от моря плотинами гидростанций США. Северо-западный участок в основном не исследован.

Поскольку через три года вернулись не все рыбы, наблюдение продолжали и в 1953 г. На следующий год на реке Хорзфлай насчитали 105 000 четырехлетних нерок, а из 46 917 обследованных в поисках метки обнаружили только одну меченую рыбу. В то же время в районе инкубатора возле самого выхода из него было выловлено 203 меченых и 66 немеченых нерок и еще 15 меченых рыб были найдены здесь мертвыми уже после нереста.

Время появления этой новой стаи у инкубатора совпало с обычным ходом нерки на реке Хорзфлай. Это, по всей видимости, указывает, что сроки хода рыбы на нерест наследственно определены, тогда как место нереста может быть искусственно изменено.

Этот эксперимент (а также аналогичные эксперименты, проведенные в других местах) показал, что рыбы возвращаются не в ту реку, которую предпочли их родители, а в ту, где они вылупились из икринок и провели свои «восприимчивые годы». Таким образом, возвращение в родные реки не носит генетического характера, а является результатом «запечатления». Это название дано теперь хорошо известному явлению: животные, птицы или рыбы приобретают пожизненную черту, или манеру поведения, в результате воздействия (или «запечатления») определенного фактора внешней среды в критический период их развития, который обычно наступает довольно рано.

Описанный эксперимент представляет собой лишь один из целого ряда опытов, говорящих в пользу того, что возвращение лососей в родные реки является скорее результатом «запечатления», чем проявлением таинственного «инстинкта возвращения». Но здесь есть одна характерная особенность. Икру, которая была отложена на реке Хорзфлай, переправили через горы самолетом на инкубатор, а затем мальков, которые вывелись из этой икры, самолетом же отправили к месту выпуска на озеро Квеснел. Поэтому, когда они выросли и пошли назад в составе стаи рыб, регулярно нерестящейся на реке Хорзфлай, им предстоял выбор — идти на нерестилища, где отложили икру их родители, или в район инкубатора, где они появились на свет. В обоих случаях нужно было двигаться незнакомым для них путем. И рыбы успешно добрались до инкубатора; это случилось не потому, что они помнили путь, которым четыре года назад спустились в море. Просто они вынуждены были свернуть в сторону, покинув спутников из основной стаи, потому что «помнили» не дорогу, а запах реки, где выросли, и эта «память» привела их прямо к выводной трубе инкубатора.

А о том, что дорогу домой им указывал именно запах, говорит следующий эксперимент. Небольшая речка Иссакуа в штате Вашингтон (США) оказалась очень удобной для проведения опытов со стаей кижучей (*Oncorhynchus kisutch*), регулярно приходящей сюда на нерест. У этой

речки и ее притока Ист-Форк есть свои нерестилища. В ноябре 1952 г. Хаслер и Уисби установили ловушку для рыб как в основном русле, так и в притоке, на расстоянии около полутора-двух километров от места их слияния. После отлова рыб, направляющихся по обоим потокам, поместили и снова выпустили ниже развилки. Но перед выпуском каждую партию разбили на две группы и у одной из них замазали вазелином или бензокаиновой мазью¹ обонятельные ямки или просто заткнули их ватой, а у некоторых рыб сделали и то и другое. Вторую группу выпустили в воду нетронутой.

Всего в нижнем течении реки было выпущено 302 рыбы, в том числе 226, пойманных в основном русле Иссакуа, и 76— в Ист-Форк. Обонятельные органы были выведены из строя у 153 особей; остальных 149 рыб отпустили как контрольных, с вполне исправным обонятельным аппаратом. При повторном отлове удалось поймать не всех помеченных рыб, но и эти рассказали ученым очень много. Из контрольных рыб, выпущенных в основном русле, было отловлено 46, причем всех их поймали снова в Иссакуа, то есть они подтвердили свой первоначальный выбор. Из выпущенных в притоке вновь отловили 27 контрольных, причем 19 из них поймали опять в притоке, а 8— в основном русле. Как видно, эти рыбы не смогли полностью подтвердить свой первоначальный выбор, но большинство все же сохранило его.

Рыбы, у которых «носы» были «заткнуты», распределились между двумя потоками совершенно произвольно, если учесть тот факт, что основное русло Иссакуа гораздо шире, чем приток. Действительно, первоначальный улов был таков: 226 рыб с Иссакуа и 76— с Ист-Форк, то есть соотношение было приблизительно 3 : 1. Из 51 вновь пойманной рыбы с выведенными из строя обонятельными органами (первоначально отловленной в основном русле) 39 особей поймали в основном русле, а 12— в Ист-Форк, то есть соотношение почти равно 3 : 1. Среди 19 вторично отловленных рыб с меткой притока и выведенными из строя обонятельными органами 16 было поймано в основном русле, а 3 — в притоке. В этом случае соотношение

¹ Вазелин затрудняет доступ пахучих веществ к обонятельным клеткам, а бензокаин (анестезирующее средство) лишает нервные клетки чувствительности.— *Прим. перев.*

равно 5 : 1, но это не столь уж сильно отличается от исходного соотношения 3 : 1, поскольку при малых числах статистика, как известно, не слишком достоверна.

Если учесть огромную важность всей проблемы миграции рыб, представляется очень странным, что этот эксперимент, поставленный лишь сравнительно недавно, только в 1952 г., чуть ли не впервые показал, что возвращение лососей в родные реки связано с процессом обоняния, то есть имеет в основе нечто вполне материальное, а не неосоздаемое, вроде «инстинкта возвращения» или таинственного «внечувственного» восприятия. Правда, Хаслер и Уисби уже сообщали (1951) о предварительных результатах пробных опытов по изучению возможности распознавания рыбами запахов воды, но, кроме этих ученых, только один исследователь (Крейджи, 1925) предпринял серьезную попытку экспериментально доказать, что в миграциях лососевых (в его случае нерки) рыбы ориентируются по запахам.

Рыба возвращается домой

Бассейн реки Фрэзер в Британской Колумбии включает большой комплекс лососевых нерестилищ. Общий водосброс реки в устье претерпевает сезонные изменения от минимального, составляющего в середине зимы около 1400 *куб. м* в секунду, до максимального (во время весеннего паводка) — около 14 000 *куб. м* в секунду. Если принять, что водосброс во время хода лососей составляет около 6000 *куб. м* в секунду, то возникает вопрос: почему «местный» запах, характерный для столь незначительного по водосбросу нерестилища, как инкубатор на озере Хорзфлай, сохраняется в огромной массе воды, попадающей отовсюду в море?

Ответ на это, по крайней мере частично, дает закон Вебера—Фехнера.

Если вернуться к приведенному ранее графику, показывающему зависимость силы запаха этилмеркаптана от концентрации этого вещества, можно увидеть, например, что для уменьшения силы запаха от средней (степень 3) до пороговой (степень 1) необходимо приблизительно 5000-кратное разведение. Если общий водосброс реки составляет 6000 *куб. м* в секунду, то при поступлении в него из района инкубатора около 1 *куб. м* воды каждую секунду в устье реки этот объем окажется разбавленным в 5000 раз, потому что $1,2 \times 5000 = 6000$. Таким образом, сравнительно скромное поступление воды с всего лишь средней концентрацией запаха родной реки может пометить этим запахом всю реку в ее нижнем течении. Но ведь цифры, приведенные выше, взяты просто в качестве примера. Если бы сила запаха родной реки у истока равнялась четырем, то потребовалось бы 100 000-кратное разведение для уменьшения силы запаха до порогового значения; таким образом, если бы водосброс главной реки упал до 3000 *куб. м* в секунду, то от родного притока потребовалось бы всего 0,03 *куб. м* в секунду — меньше, чем дает хороший пожарный шланг.

Способность рыб двигаться от устья реки вверх по течению к заранее намеченной цели, часто очень небольшого размера, например к трубе, через которую идет сброс воды

из инкубатора на реке Хорзфлай, производит исключительно сильное впечатление и чрезвычайно интересна, однако ничего таинственного в ней нет. Это явление того же порядка, что и способность самца бабочки находить самку на большом расстоянии или способность собаки идти по следу хозяина на многолюдной улице.

Мы еще очень далеки от понимания того, какое именно вещество придает реке или ручью характерный запах, воспринимаемый рыбой как родной, нам не известна и последовательность ответов на различные ориентиры, поступающие из внешней среды, с помощью которых рыба добирается домой, к источнику запаха. Возможно, что это происходит не так слепо и механически, как у плодовых мушек (см. главу IV), однако поведение рыб имеет все-таки гораздо больше общего с поведением насекомых, чем людей. Рассмотрим один пример. Мигрирующие лососи, уже свернувшие в один из мелких притоков, были пойманы, помечены и потом выпущены в основное русло выше по течению от того места, где они свернули. Позднее эти рыбы были вновь пойманы в избранном ими притоке. Очевидно, когда рыбы потеряли направляющий запах, им пришлось возвращаться и плыть вниз по течению, направляясь, в сущности, против массового хода рыб, которые спешили на другие нерестилища, расположенные выше по реке. Было бы легко предположить, что такое поведение говорит о высокоразвитом интеллекте; рыбы, может быть, действительно очень разумны, однако их поведение никак этого не доказывает. Возвращение рыб назад в поисках привлекающего запаха аналогично поведению плодовых мушек, потерявших запах гниющего банана.

Химический состав привлекающего рыб запаха до сих пор не известен. Однако совершенно очевидно, что он представляет собой нечто более сложное, чем простое сочетание температуры воды, определенного содержания в ней солей или различия в концентрации углекислоты, как это предполагали долгое время. Хаслер и Уисби в проведенных ими предварительных исследованиях, предшествовавших экспериментам на Иссакуа, поставили ряд опытов, используя в качестве подопытных животных тупоносых хиборинхусов ¹ (*Hyborhynchus notatus*). Для начала они

¹ Речные рыбки, родственные нашему пескарю и гольяну.—
Прим. перев.

выбрали два местных ручья, протекавших через разные геологические формации, и из каждого взяли пробы воды в полиэтиленовые мешки. Вода была заморожена и хранилась до использования при очень низкой температуре. В лаборатории исследователи установили два аквариума с приспособлениями для подачи небольших струек воды из обоих ручьев в противоположные концы каждого аквариума. В одном аквариуме хиборинхусов приучали связывать запах воды из одного ручья с временем кормежки, а запах воды из другого ручья — с ударом электрического тока; в другом аквариуме хиборинхусы проходили аналогичное обучение, только запах первого ручья связывали с болью, а второго — с кормежкой.

В итоге были получены вполне удовлетворительные результаты.

Оказалось, что хиборинхусов можно научить вполне четко узнавать запах каждого ручья и давать правильный ответ в зависимости от того, были ли они приучены ассоциировать данный запах с пищей или с ударом тока. После того как их обонятельные органы хирургическим или каким-либо иным способом выводили из строя, рыбы утрачивали эту способность, хотя в остальном их поведение оставалось совершенно нормальным. Это доказывало, что рыбы действительно узнавали запахи соответствующих ручьев.

Когда воду, взятую из этих ручьев, выпаривали и получали минеральный остаток, который затем вновь растворяли в дистиллированной воде, хиборинхусы уже не опознавали его. Следовательно, запах не зависел от содержащихся в воде минеральных веществ. Исчезал он и в том случае, если воду просто кипятили. Это могло означать, что вещество, обуславливающее запах, при нагревании разрушалось или улетало с паром. Если пар конденсировали и собирали, рыбы никак не реагировали на конденсат, так что вещества, придающие воде запах, очевидно, были чувствительны к нагреванию. Если воду перегоняли при пониженном давлении, то есть в таких условиях, что ее температура при этом не поднималась выше комнатной, хиборинхусы узнавали дистиллят, но не остаток. Это свидетельствовало в пользу того, что вещество, обуславливающее запах, было летучим. Так и считали, пока шли эксперименты, если бы не одно дополнительное и очень важное наблюдение.

Хиборинхусов научили узнавать воду, которую собирали в течение лета. Когда попробовали провести аналогичный эксперимент с водой, взятой в зимнее время, оказалось, что рыбки узнавали ее столь же хорошо, как и «летнюю». Зима в штате Висконсин достаточно холодная и поверхность почвы замерзает, а сток воды в ручьях очень сильно снижается. Водная растительность в это время года находится, естественно, в состоянии почти полного покоя. Постоянство запаха воды в таких условиях имеет огромное теоретическое и практическое значение в связи с постоянством миграций лососевых.

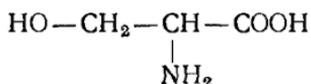
Ученые из Управления ихтиологических исследований Канады проводят эксперименты, связанные с изучением запахов, по которым рыбы узнают свои родные реки. Их интересует, будут ли взрослые нерки, находясь в большом аквариуме, реагировать на добавление в него воды из их родной реки. Использование взрослых лососей вместо хиборинхусов придает этим экспериментам огромный масштаб, но зато рыб уже не приходится предварительно обучать. Указанные опыты еще продолжаются, и к настоящему времени они показали, что лососи заметно реагируют на воду родного для них потока и что запах воды обусловлен каким-то веществом или комбинацией веществ, которые можно разрушить путем нагревания и которые не обладают ни кислотными, ни щелочными свойствами.

Ученые, вероятно, потратят много времени на подобные эксперименты, прежде чем доберутся до этих веществ и определят их, потому что слишком уж малые их количества дают явный эффект. Не исключено, что эту задачу можно решить обходным путем.

Биологам, изучающим миграции лососевых, уже давно известно, что стаю рыбы на подъеме или в узком месте потока можно временно остановить, если, например, погрузить в воду руку. Точно так же действует опущенная в воду лапа какого-нибудь зверя, например медведя, или кусок шкуры морского льва. Совершенно ясно, что в данном случае мы сталкиваемся с типичным «сигналом тревоги», который имеет большое значение для выживания видов, часто становящихся добычей разных хищников во время хода рыбы на нерест. (Интересно, что молодые рыбы, скатывающиеся в море, такой реакции не обнаруживают.) Вещество, вызывающее реакцию тревоги, получило название «фактора звериной шкуры». В отличие от

запаха родного ручья источник «фактора шкуры» был известен; это вещество можно было получать (хотя и в совершенно ничтожных количествах) просто путем полоскания рук в литре воды в течение одной-двух минут.

В результате фракционирования таких экстрактов, а также экстрактов, полученных при вымачивании медвежьих лап и шкуры морского льва, и испытания различных фракций во время хода рыбы на нерест активное вещество запаха (по крайней мере одно из них) было определено. Оказалось, что оно представляет собой L-серин—аминокислоту, которая входит в состав белков и имеет структуру



Всего 1 часть этого вещества в 80 000 000 000 частях воды способна вызывать у рыб реакцию тревоги. Совершенно очевидно, что выделить и идентифицировать это вещество было бы куда труднее, если бы его источник не был известен, а «концентрированные» растворы от мытья рук — столь доступны.

Когда прямой путь решения проблемы слишком длителен или дорого стоит, вполне допустимо и разумно поискать обходной, позволяющий избежать возникших трудностей. В данном случае химическую природу вещества или веществ, придающих воде специфический запах, по которому рыбы отыскивают родную реку, трудно идентифицировать, потому что в воде, помимо этого вещества, присутствует еще очень много других соединений, не имеющих к этому запаху никакого отношения. Обычно кратчайший путь к правильному ответу на трудный вопрос — построение рабочей гипотезы (об этом уже говорилось). Мы пытаемся предугадать правильный ответ, а затем, принимая его за правильный, путем логических размышлений приходим к какому-либо заключению, наперед неизвестному, но поддающемуся экспериментальной проверке. (Об одной из таких рабочих гипотез я уже писал в связи с изучением механизма ориентации плодовых мушек при движении их против ветра. Гипотеза, которая оказалась сама по себе совершенно неверной, помогла прийти к правильному решению.) В качестве примера я буду развивать рабочую гипотезу относительно источника запаха, по

которому рыбы узнают родную реку, и покажу, каким образом эту гипотезу можно было бы проверить.

Во-первых, мы знаем указатели, по которым ориентируются лососи, покидая море и входя в какую-то определенную реку. Это запахи. Запах реки остается постоянным из года в год независимо от сезона. На него не влияют ни лесосплав, ни лесоразработки, ни изменения сельскохозяйственного профиля прилегающих районов. Даже сточные воды городов и разнообразных промышленных предприятий не могут изменить его в значительной степени. Поэтому маловероятно, чтобы специфический запах данной реки зависел от почвы или растительности, характерных для ее бассейна. Скорее всего запах этот обусловлен самой рекой, а именно ее растительностью и постоянством популяции немигрирующих рыб.

На первый взгляд наиболее вероятным источником такого запаха кажутся водные растения, потому что они прочно связаны с дном реки. Однако паводок может смыть и снести их, а река, если она промоет себе новое русло, — оставить где-то в стороне, так что их неподвижность и фиксированность на определенном месте скорее кажущаяся.

Местная популяция рыб кажется подвижнее, однако по ряду признаков ее можно считать более постоянной, чем популяцию растений.

Ганнинг в Университете штата Индиана провел несколько очень показательных экспериментов в маленькой реке Рокленд-Крик. Перемещая по этой речушке меченых ушастых окуней (*Lepomis megalotis*), он показал, что эти маленькие рыбки удивительно строго держатся в пределах небольшого участка. Они с поразительной точностью возвращаются домой, ориентируясь, видимо, по запаху, потому что и ослепленные они так же уверенно достигают дома; рыбы, у которых повреждены органы обоняния, не находят дороги. Особенно отличилась одна рыбка. Первый раз ее поймали 10 июля 1958 г. около большого камня, служившего для экспериментаторов ориентиром. Рыбку ослепили и выпустили в реку, но уже на 100 метров ниже по течению от места отлова. 11 августа ее вновь поймали около того же камня и опять отнесли вниз по течению. 16 августа ее поймали в третий раз в 3 метрах от камня и еще раз выпустили ниже по течению, а 8 сентября она была поймана уже в 1 метре от камня. Рыбку взяли в

лабораторию и еще раз убедились в том, что она слепа. (Между прочим, ослепление рыб ущемляет их гораздо меньше, чем это может казаться, тем более что вода в ручье всегда была очень темной и мутной.)

Таким образом, ясно, что постоянная местная немигрирующая популяция рыб какого-то ручья или реки может быть весьма консервативной в территориальном отношении, так как сама их подвижность помогает избегать перемещений. А именно это необходимо для создания местной «расы» или семейства, отличающегося хотя бы в незначительной степени от подобных же групп рыб, живущих где-то в другом месте. Точно так же как каждая колония пчел вырабатывает запах собственного улья, каждая местная «раса» рыб должна создать свой собственный запах «дома». Источником его могут быть сами рыбы и сопутствующие им организмы, например грибки или бактерии.

До сих пор мы основывались на экспериментах Ганнинга или работах Хаслера и других исследователей. Теперь в качестве рабочей гипотезы можно высказать предположение, что запах родного ручья или реки, который указывает дорогу лососям, является специфическим запахом, обусловленным тем или иным видом местных, немигрирующих рыб.

Если это предположение верно, тогда мы могли бы сконцентрировать специфический запах какого-нибудь ручья, собрав представителей местного населения рыб и поместив их на некоторое время в отдельные сосуды с водой. Далее мы могли бы наблюдать, как взрослые мигрирующие лососи из этого ручья и из других будут реагировать на воду из разных сосудов.

Даже если эксперимент не удастся, мы все-таки несколько преуспеем в решении нашей задачи, поскольку сможем исключить одну из возможностей. Если же эксперимент закончится успешно, мы значительно продвинемся вперед, потому что будем располагать концентрированным источником запаха, специфичного для данной реки или ручья, а значит, сможем выяснить, за счет каких веществ создается этот запах.

Насколько мне известно, до сих пор никто не высказывал такого предположения и не ставил соответствующих опытов.

Как видно из приведенных данных, не может быть никаких сомнений в том, что лососи, направляясь к определенным нерестилищам, ориентируются по запаху. Путешествия же рыб в открытом океане от какой-то удаленной точки к устью определенной реки происходят совершенно по-иному. Мне кажется, что миграции рыб в открытом море не связаны, да и не могут быть связаны с восприятием запаха, и доказать это можно двумя путями.

Прежде всего с помощью простой арифметики.

Река Фрззер в Британской Колумбии — одна из самых крупных рек, посещаемых лососями. Если мы примем ее водосброс равным в среднем 6000 куб. м в секунду (а большую часть года он составляет меньше половины), это соответствует сбросу в море менее четырех кубических километров воды в день. Любой привлекающий рыб запах, содержащийся в этом количестве, оказался бы разбавленным водами Тихого океана и концентрация его упала бы гораздо ниже пороговых значений. Другие реки и ручьи имеют водосброс на несколько порядков меньше и тем не менее регулярно посещаются «своими» лососями в период нереста. Следует добавить, что мигрирующим рыбам приходится регулярно пересекать огромные массы воды совершенно разного происхождения. Учитывая все это, можно сделать единственный вывод, что по запаху рыбы не смогут найти путь к устью своей родной реки уже на расстоянии 800 или 1600 км от него.

Если мы вспомним эксперименты, описанные в главе IV, где речь шла о полете плодовых мушек против ветра, станет ясно, что даже достаточно сильный запах на таком удалении от устья реки не смог бы создать направленного ощущения. Запах — это явление по природе своей ненаправленное. Мухи могут лететь в направлении источника запаха только при наличии ветра. На открытых просторах северной части Тихого океана есть течения, скорость которых достигает 5 км в день. С одной стороны, это много меньше, чем скорость ветра (1,5—3 км в час), которая помогает насекомым ориентироваться в полете; с другой

стороны, не следует забывать, что рыбам, направляющимся в родную реку, приходится плыть и по течению, и поперек течения, а порой и против него.

Проблема морской навигации у рыб столь же увлекательна, сколь и трудна, и разрешить ее будет не только сложно, но и недешево, так как морские суда — весьма дорогое оборудование.

Существуют кое-какие указания на то, что по крайней мере некоторые рыбы ориентируются по солнцу и звездам. У европейских угрей, которые вырастают в реках, а затем уходят нереститься в среднюю Атлантику, в Саргассово море, глаза достигают исключительного развития к тому времени, когда они отправляются в свое удивительное путешествие. Любопытнее всего, что, для того чтобы ориентироваться по солнцу, они должны обладать какими-то внутренними биологическими «часами», позволяющими им учитывать суточное движение солнца. Впрочем, это не так уж неправдоподобно, как может показаться. Существуют доказательства в пользу того, что пчелам свойственно именно такое чувство времени и они пользуются им, отправляясь на поиски цветов.

Собаки

Первое, что необходимо усвоить начинающему исследователю, — это насколько трудно правильно поставить эксперимент, когда заранее известен его результат. Если ответа на поставленный вопрос нет и вы полностью зависите от результата эксперимента, наше утверждение все равно остается в силе.

В главе VII, например, при определении силы запаха незначительные на первый взгляд изменения в формулировке задававшегося испытуемым вопроса приводили к двум совершенно разным ответам, причем в зависимости от того, каков был ответ, подтверждалась справедливость одной из двух отличных друг от друга формул.

Проблема особенно усложняется, когда мы «просим» собаку понюхать «за нас». Это животное несравненно интеллектуальнее насекомого, поэтому оно не дает однозначного механического ответа на простой одиночный раздражитель. Собака слишком тонко организована, для того чтобы давать такой простой ответ, но интеллект ее отличается и от нашего. Она более рассеянна, более эмоциональна, склонна больше к действию, чем размышлению. Именно поэтому истинный смысл действий собаки может быть для нас довольно неожиданным. Возьмем, например, опыт, который проводили Мост и Брюкнер. Человек прошел половину пути по довольно мягкой земле, а потом сделали так, чтобы след его «растаял» в воздухе (при помощи подвешенного каната этого человека удалили), далее пустили большое колесо, на ободке которого были прикреплены ботинки с интервалом в один шаг. Собака, посланная по этому следу, прошла его весь, не заметив никакой разницы, то есть не обратив внимания на изменение природы следа. Экспериментаторы на основании этого опыта сделали вывод, что животное направлял по следу целый комплекс разнообразных запахов и что запах свежескопанной земли и травы может иметь столь же большое значение, как и специфический запах, оставленный преследуемым (который может включать запахи выделений кожи, гуталина, мыла и даже духов, накладывающиеся на естественный

запах тела человека). Кроме того, вполне возможно, что участвовавшая в описанном опыте собака полагалась на свое зрение даже в большей степени, чем на нюх, и, идя по следу, не только отличала видимые вмятины на земле, но одновременно следила за поведением своего хозяина. Последнее могло быть особенно важным, в связи с чем в любых экспериментах, проводящихся с животными, абсолютно необходимо, чтобы владелец не знал правильного ответа на задачу, которую пытается решить его животное.

Когда-то в цирке показывали лошадь, удивлявшую всех способностью складывать числа и выстукивать копытом ответ. Эта способность животного казалась совершенно недоступной пониманию, но потом заметили, что, если хозяин не знает решения, лошадь продолжает выстукивать ответ и после того, как она уже сделала необходимое число ударов. Объяснение, оказывается, заключалось в том, что владелец лошади невольно находился в напряжении, до тех пор пока она не давала нужного количества ударов, и его расслабление, незаметное зрителям, служило сигналом к прекращению выстукивания. Кличка лошади была Умный Ганс, поэтому подобного рода экспериментальную ошибку называют иногда «ошибкой Умного Ганса».

Пытаясь избежать подобного рода ошибки, Беккер, Марки и Кинг попробовали создать «проблемную клетку»¹, в которой собака должна была решать поставленную перед ней задачу самостоятельно, без какого-либо участия владельца. Их статья представляет собой классический пример действия «закона Мэрфи» («если только есть возможность появления ошибки, она появится») и его первого следствия: «Ошибка появляется тогда, когда ее меньше всего ждешь».

Собаки в этих опытах просто отказались быть машинами. Нет необходимости вдаваться в подробности экспериментального метода Марки и Кинга, чтобы понять, что они имели дело с собаками-новичками.

¹ Метод «проблемных клеток» состоит в следующем. Подопытное животное сажают в ящик, клетку или коробку, дверцы которых закрыты более или менее сложной задвижкой. Снаружи клетки помещают пищу; задача животного состоит в том, чтобы найти способ открыть дверцы. Можно поступить и наоборот: пища находится в закрытом ящике, а животное должно открыть его и войти внутрь.— *Прим. перев.*

«...первые 5—7 попыток всегда были трудными. Наивные собаки кружили по центральной камере, царапали стены, стояли на задних лапах или сидели и выли. Когда они случайно первый раз приближались и нюхали конус, раздавался звонок и подпорные стены камеры отъезжали, давая собаке возможность выйти вправо или влево. После 10—15 попыток собака совала нос в конус и настораживала уши в ожидании сигнала. Если мы намеренно задерживали сигнал, она поднимала голову, оглядывалась на стены и вновь всовывала нос в конус. Конечно, невозможно узнать, что чувствовала собака в такой ситуации...» И опять... «Собака очень быстро узнавала, что нужно для того, чтобы получить возможность выхода, и главной ее целью становился побег, а не стремление разобраться в запахах. Однако, когда — случайно или намеренно — собака избирала верный путь, она редко пренебрегала наградой, ожидавшей ее у выхода, — куском мяса».

Во избежание подобных трудностей желательно, чтобы около собаки находился ее владелец, разумеется не знающий ответа. Мултон, Эштон и Эйрз, например, сравнивали пороговые концентрации для первых восьми представителей гомологического ряда алифатических кислот в экспериментальной камере площадью 13 кв. м, которая была разделена на три «комнаты»: одна предназначалась для контролера, другая — для проведения собственно эксперимента, а третья — для собаки и ее владельца, находившихся в ней во время подготовки к опыту. Пока собака выполняла задание, контролер сидел в своем отсеке, а связь осуществлялась включением и выключением световых сигналов.

О способности собак воспринимать, узнавать и различать запахи многое могут рассказать эксперименты иного типа, не требующие сложного оборудования, но, к сожалению, мало говорящие о самом процессе восприятия запаха. Речь идет об экспериментах по розыску вещей, когда собака должна выбрать и принести предмет, которого касался определенный человек, и экспериментах по выслеживанию, в которых собака должна идти по следу какого-то одного человека среди нескольких разных следов.

Эксперименты по розыску предметов очень легко организовать, и они всегда входят в программу выставок слу-

жебных собак. В присутствии большого количества зрителей довольно трудно избежать «ошибки Умного Ганса», поэтому лучше, если зрители находятся в достаточном отдалении. При проведении таких опытов получены некоторые весьма важные результаты.

Лохнер, например, использовал тщательно очищенные деревянные палки, которые даже выдерживали в печи, чтобы лишить их всякого запаха; после такой обработки эти палки брали только специальными щипцами. Из 10—20 контрольных палок собака должна была выбрать одну, к которой прикасался определенный человек. В результате оказалось, что достаточно в течение двух минут подержать предмет кончиками пальцев, чтобы придать ему различимый собакой запах; если же предмет был взят всей рукой, для того же эффекта было достаточно нескольких секунд. Если палку до или после касания данным лицом трогал другой человек, то и это не мешало собаке правильно решать задачу. Более того, хотя собака всегда в начале эксперимента нюхала лишь свежeweымытую руку человека, она успешно определяла палку, которая была в контакте с любой другой частью тела этого человека. При этом Лохнер тщательно избегал «ошибки Умного Ганса».

Недавно Калмус повторил и подтвердил все эти эксперименты, используя вместо палок свежeweыстиранные и выглаженные носовые платки. Его эксперименты особенно интересны тем, что в них участвовали четыре пары идентичных, или однояйцовых, близнецов.

Эти эксперименты показали, что участвовавшие в них собаки без труда различали людей, не состоявших в родстве. Они различали даже членов одной семьи, если только те не были однояйцовыми близнецами. В опыте с близнецами собаки выбирали носовой платок одного из них, тогда как им давали понюхать руку другого. Если среди нескольких контрольных помещали два носовых платка и каждый из них трогал лишь один близнец, собака неизменно приносила тот из двух платков, который попадался ей первым.

Таким образом, собака различает индивидуальный запах человека независимо от того, какой части тела он принадлежит, и даже в том случае, если на него накладывается (или ему предшествует) какой-то другой. Этот индивидуальный запах, очевидно, предопределен генетически,

поскольку только идентичные (однояйцовые) близнецы имеют одинаковую генетическую конституцию и запахи их действительно чрезвычайно похожи. Запах человека не зависит, по-видимому, ни от питания, ни от одежды или домашней обстановки; это показал один эксперимент Калмуса, в котором участвовали близнецы-мужчины тридцати трех лет; оба были женаты и жили в разных местах.

Работа по следу для собаки гораздо труднее выборки вещей, потому что соотношение силы первичного запаха и случайных, попутных чрезвычайно сильно меняется при переходе следа, например, с травянистого покрова на асфальтированную дорогу или с пашни на каменистую почву. Только хорошо обученная собака может точно и надежно выполнять такие задания, а инструктор или хозяин должен внимательно следить, чтобы не менялся обычный порядок поиска, так как даже незначительные изменения (например, в подаче команд) могут провалить работу целого дня. Поэтому лишь в нескольких опубликованных статьях были описаны действительно достоверные результаты подобного рода экспериментов.

Одним из первых такой опыт поставил Романес еще в 1885 г. Он двигался во главе колонны, состоящей из двенадцати человек, выстроенных в затылок друг другу, причем все они шли точно «след в след», повторяя шаг идущего впереди. Пройдя таким образом 180 м, колонна разделилась. Романес и еще пять человек за ним двинулись в одну сторону, а вторая группа из шести человек — в другую. Через довольно значительное расстояние люди спрятались, после чего по следу была выпущена собака, которой дали задание найти своего хозяина. Собака выполнила это с очень небольшой задержкой, потому что проскочила место, где колонна разделилась на две группы. Романес старался поставить этот эксперимент так, чтобы собаку направлял только запах. И эта хорошо обученная и достаточно опытная собака избежала ошибки, которую совершила малоквалифицированная собака в эксперименте Моста и Брукнера: она охотно пошла по следу колеса, как до этого шла по следу человека.

В другом эксперименте Романес обнаружил, что собака хорошо выслеживает его и в том случае, если он часть пути проходит в обуви, а потом снимает ее и идет босиком. Когда же он обертывал свои башмаки толстой бумагой,

собака не узнавала его следа, до тех пор пока бумага не прорывалась; та же собака прекрасно шла по следу человека, надевшего башмаки ее хозяина.

Все это говорит о том, что, когда собака действительно следует за запахом, она опознает нечто реальное, физическое присутствие чего-то, что оставляет за собой на земле преследуемый. Собака может извлекать дополнительные указания из следов в виде углублений в почве или примятой растительности, но главный ключ ее поиска — обоняние. Нетренированный пес, вероятно, полагается главным образом на видимые глазом следы и может с одинаковым успехом выследить человека, идущего на ходулях и на собственных ногах. Тот факт, что след, по которому обычно идет собака, определяется физическим контактом выслеживаемого человека с землей, был использован Мостом и Брукнером, когда они с помощью подвесного троса проносили человека над полем очень близко к поверхности, но без прикосновения и обнаружили, что собаке в таких условиях ориентироваться не на что.

Настоящий пахнувший след обусловлен индивидуальными выделениями тела, которые пропитывают материал обуви и через нее частично остаются на пути человека. Примечательно, что новая обувь начинает оставлять индивидуальный след не сразу, а только после того, как ее носят в течение одного-двух дней, а резиновые боты или галоши полностью препятствуют образованию индивидуального следа.

Учитывая все это, интересно еще раз обратиться к опытам Калмуса, в которых принимали участие близнецы. Как и следовало ожидать на основании экспериментов с выборкой, если собаке давали почувствовать запах первого близнеца, она прекрасно шла по следу другого, при условии что в этом опыте участвовал только второй близнец.

Однако, когда близнецы расходились в разных направлениях и прятались, собаке удавалось выследить именно того близнеца, запах которого был ей задан. Отсюда ясно, что идентичные близнецы имеют запахи очень сходные, но все же не вполне совпадающие. Это очень напоминает положение, когда мы, встретив на улице одного из двух близнецов, не можем с уверенностью сказать, который же это именно, хотя различаем их, если видим вместе.

Калмус отмечает, что в его эксперименте собака, уверенно шедшая по следу одного из близнецов, была ужасно смущена и взволнована, когда они неожиданно предстали перед ней одновременно.

Физическую сторону узнавания и выслеживания тщательно исследовал Нейхаус.

Он начал с того, что сконструировал прибор, с помощью которого можно было добавлять к потоку воздуха чрезвычайно малые, но точно контролируемые количества пахучего вещества. (Это совсем нелегко сделать, когда количества добавляемого вещества во многие миллионы раз меньше общего тока воздуха; метод решения этой проблемы Нейхаусом был одновременно и простым и точным.) Затем он установил три небольших ящика с подвешенными на петлях крышками. В одном из них был спрятан кусок сахара, а перед этим ящиком шел ток пахнущего воздуха. Два других были пусты, а ток воздуха, выходящий перед ними, запаха не имел. Собаку обучили связывать запах с поощрением сахаром и, следовательно, по наличию запаха выбирать нужный ящик. Можно было с уверенностью считать, что в этих опытах собака пользуется только обонянием, так как, когда запах был очень слабым, животное прижимало нос непосредственно к отверстию, из которого шел ток воздуха, и делало глубокий продолжительный вдох, точно так же как при «исследовании» мышьиной норы. Кроме того, такая постановка эксперимента исключала всякие сомнения относительно истинной концентрации пахучего вещества в воздухе, попадавшем в нос животного. Определенные таким способом пороговые концентрации можно считать более достоверными, чем те, которые получил, например, Моултон, в опытах которого пахучее вещество находилось в растворе, а концентрация его в воздухе над сосудом устанавливалась расчетным путем.

С помощью своего прибора Нейхаус показал (как уже отмечалось), что значения пороговых концентраций некоторых веществ для собак несущественно отличаются от соответствующих значений концентраций этих веществ для людей, в то время как у других веществ эти значения гораздо ниже; так, например, пороговые концентрации масляной и других алифатических кислот для собак в миллион раз ниже, чем для людей.

Пороговая концентрация
(число молекул в куб. см
воздуха)

Кислота	Человек	Собака
Уксусная	$5,0 \times 10^{13}$	$5,0 \times 10^5$
Пропионовая	$4,2 \times 10^{11}$	$2,5 \times 10^5$
Масляная	$7,0 \times 10^9$	$9,0 \times 10^3$
Валериановая	$6,0 \times 10^{10}$	$3,5 \times 10^4$
Капроновая	$2,0 \times 10^{11}$	$4,0 \times 10^4$
Каприловая	$2,0 \times 10^{11}$	$4,5 \times 10^4$

При рассмотрении обонятельной способности собак эти цифры очень важны, так как известно, что алифатические кислоты присутствуют в кожных выделениях млекопитающих, в том числе и человека. Дальнейшие рассуждения Нейхауса выглядели следующим образом.

Существует несколько источников кожных выделений: потовые железы, «пахучие железы», жировые железы, а также ряд других. На подошвах ног имеются только потовые железы, но зато их там очень много — до 1000 на каждый квадратный сантиметр. Поэтому, вероятно, именно они в первую очередь и отвечают за происхождение пахучего следа. За сутки человеческое тело выделяет около 800 куб. см пота. На долю примерно двух миллионов потовых желез каждой подошвы приходится около 2% этого количества, или 16 куб. см ежедневно. Пот человека содержит приблизительно 0,156% кислот, причем около четверти этого количества составляют алифатические кислоты. Если лишь одна тысячная часть этих выделений проникает через подметку и швы ботинка наружу, то можно подсчитать, что по крайней мере $2,5 \times 10^{11}$ молекул кислоты типа, например, масляной будет оставаться на поверхности каждого отпечатка ноги. Это количество более чем в миллион раз превышает пороговое значение для собаки и может создавать ощутимый запах, распределившись в 28 куб. м воздуха. В естественных условиях скорость испарения вещества с какой-либо поверхности будет зависеть от температуры и поглощающей способности этой поверхности, поэтому при благоприятных условиях собака может идти по следу даже суточной давности.

Нейхаус отмечает в своих статьях, что рассчитанные для следа количества жирных кислот превышают поро-

говые концентрации для человека, так что и человек должен различать действительно свежий след. Чтобы доказать это, Нейхаус клал листы чистой промокательной бумаги на паркетный пол и просил кого-нибудь пройти по ним с нормальной скоростью. Спустя примерно 30 секунд эти листы дали другому человеку, с хорошим обонянием, и тот уверенно только по запаху определил место следа.

Помимо масляной кислоты, запах следа зависит от присутствия по крайней мере еще десятка алифатических кислот, а также веществ иных классов, в том числе, вероятно, индоксила, фенолов, диацетила и некоторых других продуктов. Поэтому в последующих экспериментах Нейхаус видоизменил свой прибор таким образом, что с его помощью собаке можно было предлагать в потоке воздуха не одно пахучее вещество, а более или менее сложную смесь их.

Результаты опытов с использованием этого прибора оказались поистине удивительными.

Для смеси масляной и изовалериановой или капроновой кислот, например, порог ощущения был значительно ниже пороговых концентраций соответствующих индивидуальных веществ. Нейхаус на этом основании сделал вывод, что указанные вещества имеют что-то общее, помогающее им взаимно усиливать запах друг друга. Для смеси совершенно несхожих веществ, таких, как масляная кислота и α -ионон, порог приблизительно соответствовал пороговым концентрациям каждого из этих соединений. В случае смеси масляной кислоты и диацетила пороговая концентрация имела промежуточное значение: она была ниже порогов индивидуальных веществ, но не настолько, как для смеси двух кислот.

В другом эксперименте собака должна была отличить смесь из четырех алифатических кислот (пропионовой, масляной, изовалериановой и каприловой) от такой же смеси, содержащей, кроме того, небольшое количество пятой кислоты — капроновой. Оказалось, что собака может различать их даже в тех случаях, когда концентрация капроновой кислоты⁷ значительно ниже порога ее индивидуального восприятия. Другими словами, характер сложного запаха может меняться в присутствии подпороговых количеств примесей или следов других компонентов. Когда Нейхаус повторил эксперимент с добавлением капроновой кислоты к смеси из четырех очень различных по запаху

веществ (диацетила, эвгенола, ионона и нерола), оказалось, что, для того чтобы собака ощутила изменение запаха этой смеси, необходимо было добавлять в нее капроновую кислоту в количестве, превышающем значение пороговой концентрации этого вещества, взятого в чистом виде. Очевидно, в выбранной для опыта смеси пахучих веществ не содержалось такого компонента, который мог быть усилен или видоизменен капроновой кислотой в ощутимой степени, вследствие чего пришлось превысить пороговую концентрацию самой добавки, чтобы собака заметила ее присутствие.

В результате всех этих опытов Нейхаус пришел к выводу, что собака отличает индивидуальный запах человека не по наличию какого-либо вещества, свойственного именно этому человеку, а скорее всего благодаря определенному «набору» веществ, которые даже в подпороговых количествах создают этот индивидуальный запах.

Теоретические аспекты этого вопроса будут рассмотрены позднее, но, если заглянуть немного вперед, можно представить себе все приблизительно следующим образом.

Характеристики двух сходных веществ, например масляной и капроновой кислот, и отличного от них вещества, например ионона, можно изобразить так:

Масляная кислота	---	+	---	+	---	+	+	+	---	---	+	---
Капроновая кислота	---	+	---	---	---	+	+	+	---	---	+	+
Ионон	+	---	---	---	---	+	---	---	---	---	+	+

Очевидно, эти кислоты подобны по запаху, хотя и не идентичны, а в смеси они могут усиливать друг друга в нескольких общих для обоих веществ точках. Запах ионона вообще не имеет ничего общего с запахом этих кислот, вследствие чего воздействие смеси ионона с кислотами на органы обоняния проявляется лишь в виде суммы воздействий компонентов, но никак не умножается.

Если собака в результате естественного отбора приспособлена больше к поиску, чем к общему восприятию окружающих ее запахов, значит, ее обонятельный аппарат специализирован в значительной степени для восприятия запаха веществ, связанных с потом, и в меньшей степени — для восприятия запаха тела, который не так специфичен, как запах ступней. Многие исследователи отмечали

любопытный факт, что собака, понюхав только руку, может правильно находить платок, который некоторое время находился под мышкой, хотя для нас эти два запаха совершенно различны.

Мне кажется, что наиболее интересное и ценное в экспериментах с собаками, и особенно в расчетах и измерениях Нейхауса, состоит в том, что они лишают всякие трюки с собаками магического ореола и не ставят их в зависимость от неопределенного «инстинкта» или сверхъестественного «внечувственного» восприятия.

Все это имеет и практическую ценность. Во многих странах собаки помогают полиции расследовать преступления и задерживать преступников. Если мы поймем, каким образом они делают такие чудеса, мы сможем лучше использовать их и избежим возможных трагических ошибок. Хорошая собака-ищейка должна быть великолепно тренирована в прослеживании определенного запаха независимо от посторонних запахов и всяких мешающих зрительных ощущений, которые могут сбить слабо тренированную собаку. Собака-ищейка — это специалист, и не следует использовать ее для других целей, например для обычной сторожевой службы. Кроме того, не один Нейхаус настаивал на том, что во время обучения нельзя наказывать экспериментальных собак. Животное, обычно не обращающее никакого внимания на шлепки, сильно реагирует на легкое наказание во время эксперимента и выходит из-под контроля на весь остаток дня. Вполне достаточно устных замечаний.

Хорошая собака-ищейка — это точный прибор, и обращаться с ней надо именно как с точным прибором.

Запах и информация

Предположим, что вам дали ряд сосудов и попросили определить их содержимое по запаху. Вы нюхаете их один за другим и говорите: табак, мята, мыло, ваниль, розы, бензин, пот, аммиак, рыба, шоколад, тухлые яйца, лаванда, резина, дым, кедровое масло, свежий хлеб и так далее. А насколько «далее», спрашивается?

Почти все могли бы значительно расширить этот перечень и подразделить каждый запах, определяя, например, вид дыма: дым сигареты, сигары, горящего дерева, угля, масла, хлеба. Если вы опытный химик-парфюмер, вы, вероятно, различаете множество ароматов различных духов с запахом розы, то есть находите массу различий в запахах, объединенных общим названием «запах розы», который можно назвать подразделом еще более общего класса цветочных запахов. Если ваша профессия — определение запаха рыбы (такие специалисты действительно существуют), то вы по запаху определите свежесть и качество рыбы и тем самым ее цену.

При изучении окружающих нас запахов обнаруживается, что обычный человек без труда различает до нескольких тысяч запахов, а опытный специалист — гораздо больше десяти тысяч. Некоторые говорят, что число воспринимаемых запахов практически неограниченно.

Было бы интересно представить себе эксперимент, проверяющий правильность всех этих оценок.

Если, как мы видели, собака может отличить друг от друга двух любых людей (в том числе даже идентичных близнецов, хотя это гораздо труднее), то можно считать, что действительное число различимых запахов очень велико и цифра десять тысяч, конечно, занижена. В том случае, когда мы идентифицируем предмет, мы не только говорим, что он такое, но в то же время определяем все, чем он не является. Это означает, что мы должны получить и обработать некоторое количество информации о нем.

Предположим, например, что я указываю вам на ряд различных предметов и говорю, что я думаю об одном из них. Вы должны найти этот предмет, задавая вопросы, на

которые я буду отвечать кивком головы в случае утверждения. (Молчание равнозначно тому, что я говорю «нет».) Вы могли бы найти правильный ответ, если бы двигались от одного предмета к другому, спрашивая: «Этот? Этот? Этот?», пока не дошли бы до нужного; однако такой метод неэффективен. Гораздо быстрее вы достигнете цели, если будете действовать систематически.

Можно разделить весь ряд предметов так, что половина будет по одну сторону черты, а половина — по другую. Теперь, если вы меня спросите: «Предмет находится на этой стороне?», любой ответ независимо от того, каким он будет, отрицательным или положительным, исключает половину предметов. Если предметов 8, вам понадобится только три вопроса, потому что найти один предмет можно тремя последовательными делениями 8 на 2. Если предметов 16, вам понадобится четыре вопроса, а для 32 предметов — пять. Если предметов 1 048 576, то для нахождения одного из них понадобится всего 20 соответствующим образом поставленных вопросов.

Инженеры-связисты, в чьи обязанности входит разработка возможно более эффективных систем связи, в частности телефонной, создали общую теорию, известную под названием теории информации, которая включает и те вопросы, о которых мы только что говорили. Информацию измеряют в битах; один бит — это количество информации, необходимое для уменьшения неопределенности вдвое. Пропускная способность канала — это число битов информации, которое он может пропустить в течение одной секунды.

Предположим, что имеется восемь различных предметов, каждый из которых может быть определен тремя битами информации. Если для того, чтобы задать вопрос, вам понадобится 1 секунда и еще одну секунду займет мой ответ кивком головы, тогда пропускная способность канала связи между нами составит 1 бит в 2 секунды, или $\frac{1}{2}$ бита в секунду. Чтобы найти один предмет из восьми (2^3), при такой скорости вам понадобится 6 секунд; 10 секунд уйдет на то, чтобы найти один предмет из 32 (2^5), а для того, чтобы выбрать один предмет из 1 048 576 (2^{20}), потребуется 40 секунд. Это будет справедливо, только пока я анализирую: киваю головой или не киваю, говорю «да» или не говорю ничего, нажимаю на кнопку или не нажимаю и т. д. Иначе говоря, сигнал может быть передан пучком

света, который попадает в ваши глаза, отражаясь от моей головы (вы видите, как я киваю), звуковой волной, когда я говорю «да», или электрическим импульсом, когда я нажимаю на кнопку. Если мы знаем пропускную способность канала в битах в секунду, значит, нам известна какая-то характеристика этого канала независимо от того, будет ли это луч света, медная проволока или нервное волокно.

Легко понять, что все эти определения в значительной степени искусственны, так что нет ни возможности, ни необходимости волноваться по поводу информации, содержащейся в слове «милый», которое прошептали вам на ухо. И действительно, обычно это так и бывает, так как число слов, близких по звучанию, которые могли бы прошептать вам на ухо, достаточно мало, а на столь коротком пути уменьшение силы звука незначительно, к тому же предполагается, что вокруг довольно тихо. Но, если говорящий находится на другой стороне оживленной улицы, ему совершенно необходимо знать, сколько раз нужно повторить это слово, чтобы вы были уверены, что сказано «милая», а не «мыло» или что это относится совсем не к вам, а к стоящей рядом женщине, которую зовут Мила.

Какое отношение имеет все сказанное к запаху и обонянию, достаточно ясно (и очень важно). Если вы можете сразу, в течение $\frac{1}{2}$ секунды, различить один из десяти тысяч или более запахов, то ваш обонятельный аппарат имеет какую-то определенную пропускную способность. Необходимо 14 битов информации для нахождения одной возможности из 16 384 ($2^{14} = 16\,384$); если, например, любой из этого количества вариантов может быть определен за $\frac{1}{2}$ секунды, то пропускная способность канала составляет по меньшей мере 28 битов в секунду. Наш обонятельный аппарат должен иметь некоторую минимальную степень сложности, чтобы соответствовать этим требованиям. Пропускная способность его может быть больше минимально необходимой, но никак не меньше. Если она больше некоторого определенного минимума, то про канал говорят, что он обладает «избыточной пропускной способностью», которая помогает предотвращению ошибок и уничтожению помех. (Слово «милая» звучит лучше, когда его повторяют несколько раз, а может случиться, что его необходимо повторить, если вокруг шумно, а вам необходимо быть уверенным, что это не имя Мила.)

Какими свойствами должны обладать наши органы обоняния, чтобы иметь минимальную пропускную способность 28 битов в секунду? Для ответа на этот вопрос необходимы некоторые сведения о нервных волокнах и нервных импульсах.

Нерв по существу представляет собой неметаллический проводник — трубку, заполненную разбавленным соевым раствором (электролитом). Важным следствием этого является высокое электрическое сопротивление нерва, так что очень короткий его отрезок соответствует очень длинному проводнику из металла. Распространяясь вдоль проводника, электрический импульс теряет свою первоначальную форму (как бы «размазывается»); нечто подобное происходит, когда человек кричит что-то в один конец длинной трубы, а вместо слов на другом конце можно услышать только нечленораздельные звуки, вроде рычания или гудения. Для предотвращения этого явления в телефонных или телеграфных линиях устанавливают «повторители», или ретрансляторы. Что же касается нервов, то их природа обеспечила специальными устройствами, так называемыми перехватами Ранвье, которые служат для тех же целей. В силу своего технического устройства (вытянутая трубка, заполненная соевым раствором) и действия ретранслирующих перехватов одиночное нервное волокно или проводит данный импульс, или не проводит его. Иначе говоря, нерв работает по принципу «все или ничего», а не по принципу «более или менее». Это можно продемонстрировать, непосредственно измеряя сигналы, проходящие по нерву. При таком измерении сигнал имеет вид короткого электрического импульса, называемый спайк-потенциалом (пик-потенциалом) из-за его формы на экране осциллографа. Продолжительность его несколько меньше $\frac{1}{100}$ секунды. После прохождения импульса нерв должен «отдохнуть» в течение определенного промежутка времени, прежде чем он сможет пропустить другой импульс, или спайк. Этот рефрактерный период занимает около $\frac{1}{20}$ секунды, так что одиночное нервное волокно может пропускать не более 20 импульсов в секунду.

Итак, одиночное нервное волокно имеет пропускную способность только 20 битов в секунду, если считать наличие или отсутствие импульса эквивалентным киванию головой при игре в вопросы и ответы. Для передачи информации в 14 битов мы можем использовать один канал или нерв,

передавая серию из 14 импульсов или пропусков, например $+++---+-----++---+$. Если пропускная способность канала составляет 20 битов в секунду, то нам понадобится почти три четверти секунды для передачи 14 битов информации подряд. Этот вид передачи использует так называемое серийное кодирование и является довольно медленным.

Мы могли бы удвоить скорость передачи, используя два нерва и направляя половину «послания» по одному, а другую половину — по второму. Однако это очень усложнило бы передачу, потому что «послание» нужно было бы как-то разделить и, кроме того, потребовался бы довольно сложный принимающий аппарат, который соединял бы обе половины «послания» воедино.

По-видимому, гораздо разумнее предположить, что, если для нашего обоняния необходим такой аппарат, который мог бы регистрировать, скажем, 16 384 (2^{14}) разных запахов, должно быть не менее 14 различных типов чувствительных органов, каждый из которых способен регистрировать элементарный запах определенного качества. Тогда при наличии непосредственной связи чувствительного приемника с перерабатывающими информацию центрами мы могли бы «продемонстрировать» 16 384, или 2^{14} , различные комбинации, соответствующие 16 384 запахам, которые необходимо различить. В действительности эта величина была бы много больше необходимого минимума пропускной способности, потому что «сложную картину» или систему спайк-потенциалов можно было бы посылать каждую $\frac{1}{20}$ секунды. Однако избыточная пропускная способность весьма необходима, если мы хотим избежать ошибок, особенно при шумах в канале.

Таким образом, на основании пропускной способности нашего органа обоняния можно предполагать, что этот орган имеет более 13—14 разновидностей окончаний, каждое из которых соответствует определенному виду элементарного, или первичного, запаха. Поэтому положение здесь гораздо сложнее, чем при восприятии нами цвета, когда имеется только три первичных цвета, и, с другой стороны, проще, чем при восприятии звука, когда число возможных чистых тонов значительно превосходит 100. (Рояль, у которого нет интервалов меньше полутона и который не охватывает всего нашего диапазона слышимости, имеет тем не менее 88 клавиш.)

Цвета можно довольно легко классифицировать по «трехцветной» шкале. Для классификации звуков такой системы нет, и, несмотря на многие попытки, нет сколь-нибудь удовлетворительных систем для описания или классификации запахов. Этому трудно найти объяснение при наличии всего лишь нескольких первичных запахов, но, если число их достаточно велико, все становится яснее. Именно существованием большого числа первичных запахов можно, вероятно, объяснить неудачу Крокера и Хендерсона, которые пытались создать систему классификации, основанную на четырех первичных запахах. Такая же неудача постигла и Хеннинга, который исходил из шести первичных запахов, и Зваардемакера, предполагавшего, что существует только девять первичных запахов.

Для идентификации десяти тысяч различных запахов необходимо более 13 битов информации, — при этом еще не учитывается необходимость регистрации силы запаха, а речь идет только о его качестве. Для одновременной передачи как качественной, так и количественной информации — с учетом возможных ошибок и помех в системе — необходима некоторая избыточная пропускная способность канала. Иначе говоря, система должна обеспечивать прохождение несколько большего числа битов, чем минимально необходимое при строгом подсчете. Как указывалось раньше, 20 битов могут определить любую из 1 048 576 возможностей, а 25 битов обеспечат более 30 миллионов. Примитивные организмы, вроде мелких насекомых, могут обходиться системой обоняния, воспринимающей только один первичный запах, например запах полового аттрактанта. Если насекомое чувствует этот запах, то оно соответственно реагирует на него, если же запах отсутствует, незачем обременять его способностью разбираться в ненужных запахах, которые привлекают иных насекомых.

Для более высоко организованных живых существ необходим обонятельный аппарат с более высокой информационной способностью. Медоносная пчела, например, должна уметь различать один вид цветов среди многих разных видов, однако ей совершенно не нужно отличать сардины от сыра. Если пчела различает 6 первичных запахов, то она может регистрировать и узнавать 64, то есть 2^6 , различные их комбинации. Этого количества вполне достаточно для ее существования, и оно может быть принято как минимум. Максимум для пчел, вероятно, не превышает

10—11 первичных запахов, которые обеспечивают способность различать несколько тысяч видов цветов (1024, то есть 2^{10}).

У собак или других наиболее одаренных обонятельной способностью животных число первичных запахов составляет, вероятно, 25—35, и это количество обуславливает способность различать многие миллионы запахов, даже при наличии некоторой избыточной пропускной способности канала. Как мы увидим в следующей главе, микроскопическое исследование обонятельных тканей показывает, что они устроены в соответствии с требованиями теории информации. Имеются некоторые данные, свидетельствующие о том, что у кролика число рецепторных окончаний (а следовательно, и число первичных запахов) равно 24, что очень похоже на истину.

Такого рода применение принципов устройства систем связи к проблеме запаха является сравнительно новым (приоритет здесь принадлежит Хейнеру и его соавторам, США) и весьма плодотворным: оно позволило ликвидировать многие запутанные теории и ряд неясностей, например длительное отсутствие удовлетворительного способа классификации и описания запахов. На основании этой теории удалось объяснить также, почему какое-нибудь химическое вещество, на запах которого энергично реагирует бабочка непарного шелкопряда, может почти или даже совсем не иметь запаха для человека.

Если собака, например, может воспринимать 25 первичных запахов, а человек — только 24, то вполне понятно, что существует по крайней мере один первичный запах, которого мы в отличие от собаки не чувствуем. В предыдущей главе было приведено несколько доказательств того, что на основании запаха некоторых веществ, например масляной кислоты, собака может получить информацию, которой не получает человек. Но если есть один такой первичный запах, то их может быть и несколько, а поэтому нет ничего удивительного, что какие-то вещества или предметы, обладающие для человека сильным запахом, могут совершенно не иметь запаха для шелкопряда, и наоборот. И даже более того: объекты, запах которых всем людям представляется одинаковым, могут восприниматься какими-то животными либо как одинаково пахнущие, либо как пахнущие по-разному.

Ткани и волокна

Анатому, с помощью микроскопа изучающего рецепторный аппарат носа, можно сравнить с гигантом километрового роста, который вздумал разобраться в сети коммуникаций Лондона или Нью-Йорка. Он, вероятно, заключил бы интересующий его объект в парафин и сделал бы с него тонкие срезы в различных направлениях. Если его инструменты достаточно хороши, он сможет сделать срезы толщиной около трех метров, не менее. Первокласные оптические приборы помогли бы ему рассмотреть эти срезы с расстояния, соответствующего в принятом нами масштабе примерно сотне метров. Он мог бы попытаться сделать и более тонкие срезы, но его инструменты оказались бы, вероятно, столь же точными, как у нас бейсбольная бита или топор. Используя краски, которые окрашивают штукатурку или бетон и не окрашивают металл или стекло, он смог бы проследить расположение всех коммуникационных устройств, рассматривая по очереди один срез за другим.

С помощью другого эксперимента наш гигант смог бы изучить разнообразные проявления городской жизни. Нарушив, например, движение транспорта в наиболее оживленной части города, он смог бы наблюдать образование заторов в прилегающих районах.

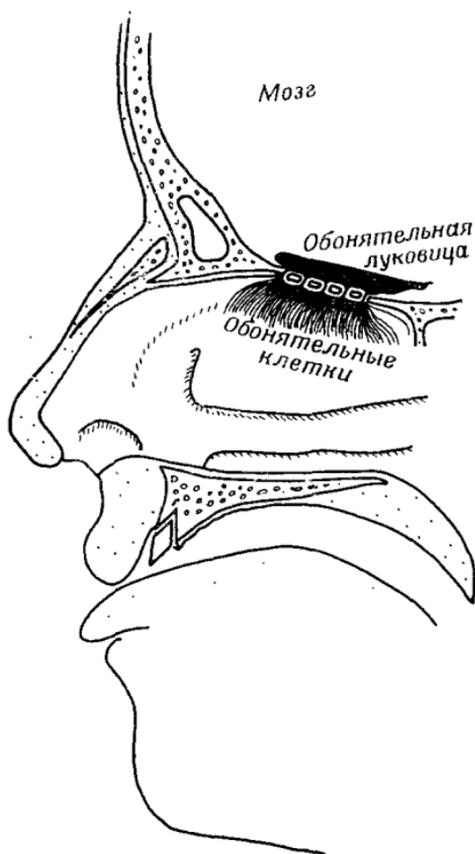
Если у него хватит терпения и денег (для приобретения необходимого оборудования), то со временем при хорошо продуманной постановке эксперимента он, вероятно, сумеет основательно разобраться в организации связи в современном городе. Он может никогда не узнать подробно устройства телефонного аппарата, однако интуитивно должен предполагать, что подобная вещь существует. По ходу своего исследования он поймет, что, помимо телефонной связи, есть еще почта, доставляющая письма и посылки, и — по крайней мере частично — представит себе систему аварийной сигнализации на случай пожаров или преступлений.

Такие методы исследования очень напоминают применяемые гистологами или физиологами, а строение органов

обоняния во многом аналогично системам связи и сигнализации. Периферический рецепторный аппарат обонятельного анализатора, обонятельный эпителий, расположенный в области верхнего носового хода, построен из разных клеток (фиг. 13). Обонятельный эпителий, состоящий из обонятельных клеток, собирающих огромную информацию об окружающем нас мире запахов, пронизан кровеносными сосудами, имеет температурные рецепторы (они, кроме того, реагируют на некоторые химические соединения вроде камфары или ментола) и обычные хеморецепторы. Воздействие на хеморецепторы таких вредных или едких веществ, как формалин или аммиак, вызывает болевые ощущения. Каждый вид клеток обонятельного эпителия имеет собственную связь с мозгом. Эти связи столь же автономны, сколь и взаимосвязаны, подобно электрической, телефонной и телеграфной сетям города. И, наконец, что окончательно усложняет и без того достаточно трудную задачу анатома, наш мозг сливает сигналы, идущие от разных рецепторов, в один и представляет их на суд нашего сознания в виде единого сложного ощущения, причем анализировать получающийся результат далеко не просто.

Между анатомом, разбирающим устройство рецепторного аппарата носа, и гигантом, изучающим трехметровой толщины срезы Нью-Йорка, достаточно общего, чтобы объяснить, почему вопросов в этой области гораздо больше, чем ответов. Микроскопическая анатомия органов зрения и слуха разработана более детально: отчасти потому, что для человека зрение и слух гораздо важнее, а также потому, что соответствующие структуры крупнее и легче поддаются исследованию. Процесс обоняния идет на молекулярном уровне; соответственно уменьшаются размеры структур и возрастает сложность их изучения.

В довершение всего у человека и высших животных обонятельный аппарат расположен в верхней части носового хода, примерно на уровне глаз, очень близко к мозгу. Это делает его малодоступным для изучения и наблюдения на живых организмах. Посмертное исследование осложняется тем, что еще при жизни вся обонятельная область постоянно открыта инфекции, попадающей туда с воздухом, поэтому нередки случаи патологических изменений этой области. После смерти очень быстро наступают дегенеративные изменения: уже через час многие тонкие



Ф и г. 13. Расположение обонятельных клеток в верхней части носовой полости.

структуры оказываются совершенно разрушенными. Поэтому о строении обонятельного эпителия человека известно несравненно меньше, чем о соответствующих образованиях лягушки, кролика или некоторых видов рыб.

Прежде чем мы перестанем сопоставлять устройство наших носов со службой связи большого города, следует принять к сведению еще одно обстоятельство. Пока город живет, всегда существует проблема ремонта и технического обслуживания, иначе система связи придет в негодность. Это справедливо и для органов чувств животного и может в известной мере объяснить, почему они построены из таких (с точки зрения инженера) экзотических материалов, как студневидная масса и солевой раствор. Когда портится телефонная связь, сломавшуюся деталь можно

изъять, заменив готовой запасной частью. Живой организм не может поступить так с вышедшими из строя деталями. В нем эти детали должны разбираться по молекулам и одновременно замещаться новыми. С этой точки зрения жидкости и студневидная масса, из которой построены ткани, подходят живым организмам гораздо более, нежели медная проволока и пластмасса. А строительные материалы, как известно, в значительной мере определяют и форму сооружения.

Нервное волокно представляет собой сильно вытянутую трубку из студневидного вещества, заполненную солевым раствором одного состава и омываемую солевым раствором другого состава. Эти растворы содержат электрически заряженные ионы, по отношению к которым напоминающая мембрану оболочка нерва обладает избирательной проницаемостью. Из-за различия в скоростях диффузии отрицательно и положительно заряженных ионов между внутренней и наружной поверхностью нервного волокна имеется некоторая разность потенциалов. Если ее мгновенно снизить, то есть вызвать местную деполяризацию, эта деполяризация распространится на соседние участки мембраны, в результате чего по волокну побегит ее волна. Это и есть так называемый спайк-потенциал, или нервный импульс. Мембрана не может быть разряжена частично: она деполяризуется полностью на всем пути или не деполяризуется совсем. Кроме того, после прохождения импульса требуется некоторое время для восстановления первоначального потенциала мембраны, причем, до тех пор пока потенциал мембраны не восстановится, нервное волокно не сможет пропустить следующего импульса. Природу возникновения нервного импульса (по закону «все или ничего») и следующего за прохождением импульса рефрактерного периода (или периода возвращения волокна в первоначальное состояние) мы рассмотрим подробнее в последней главе книги. Если возбуждение получено где-то посередине волокна, импульс должен был бы распространяться в обе стороны. Но этого обычно не происходит, так как нервная ткань «сконструирована» таким образом, чтобы сигнал в любой данный момент шел в каком-то определенном направлении. Для этого нервные волокна соединены между собой в нерве специальными образованиями, синапсами, пропускающими сигналы только в одном направлении.

Как происходит распространение возбуждения по нерву, известно довольно хорошо. Однако до сих пор не выяснен в деталях механизм процесса первичного возбуждения. Мы знаем, что этот механизм включает местную деполяризацию клеточной мембраны, но каким образом она происходит, пока не ясно. В некоторых случаях причиной может быть механический прогиб, изменяющий проницаемость мембраны по отношению к ионам. (Возможно, что именно так возникает возбуждение в органах слуха и осязания.) В других случаях деполяризация может быть вызвана непосредственным химическим действием посторонних веществ на оболочку нервной клетки, например при попадании соли в рану. Что же касается запаха, то мы просто не знаем, какое именно свойство молекул пахучего вещества вызывает нервный импульс; ясно только, что это каким-то образом происходит. В дальнейшем мы рассмотрим некоторые современные гипотезы, которые, к сожалению, пока еще остаются только гипотезами...

А сейчас познакомимся с анатомией собственно обонятельного аппарата, не обращая внимания на опорные структуры, кровеносные сосуды и температурные и болевые рецепторы, связанные с ним (фиг. 14).

Молекулы пахучего вещества, находящиеся во вдыхаемом воздухе, входят в непосредственный контакт со специальными окончаниями нервных клеток, в которых и возникает первичное ощущение. Нервная клетка представляет собой цилиндрической формы студенистый мешочек с солевым раствором внутри и снаружи. Внутри него находится ядро, которое, по-видимому, управляет внутриклеточными процессами. Окружающую ядро цитоплазму называют обычно телом клетки. Обонятельные клетки представляют собой биполяры, то есть каждая из них имеет по два отростка, отходящих от тела клетки в двух диаметрально противоположных направлениях.

Отросток, направляющийся от тела клетки к собственно воспринимающим элементам, — это цилиндрическая палочкообразная структура около 1 микрона (μ) в диаметре (1 микрон равен 0,001 мм) и от 20 до 90 микронов в длину. Каждая такая палочка имеет на конце небольшое вздутие — обонятельный пузырек, который несколько выступает над поверхностью обонятельного эпителия. От пузырька отходит несколько очень тонких нитевидных



Ф и г. 14. 1 — две микрофотографии биполярных клеток обонятельного эпителия пятидневной мыши. На нижней части снимков можно видеть аксон, ведущий в обонятельную луковицу мозга; 2 — монтаж трех фотографий обонятельного эпителия крысы. Это единственный срез, который удачно прошел через тело клетки, включая аксон (внизу) и дендрит (вверху). На фотографии, кроме того, частично видны три опорные клетки; 3 — часть дендрита кошки; 4 — окончание дендрита, или обонятельный пузырек, свиньи. Видны базальные части ресничек, или обонятельных волосков; в верхней левой части снимка видны поперечные срезы нескольких ресничек; 5 — реснички, отходящие от дендрита свиньи, образуют над поверхностью обонятельного эпителия сплетение нервных волокон, представляющее чувствительную поверхность, с которой контактируют молекулы пахнущих веществ; 6 — поперечный срез обонятельного эпителия свиньи, показывающий окончания трех дендритов, слегка выступающие над опорными клетками. *Вверху*: сплетение (войлок) обонятельных волосков.

структур диаметром менее 0,2 микрона (их можно увидеть только в электронный микроскоп). У кролика этих нитевидных ресничек может быть от 9 до 16. Длина их точно не установлена. В ранних работах она определялась в 2 микрона, однако более поздние исследования показали, что у лягушки и морской свинки эти реснички выступают на 3—4 микрона, а затем поворачивают под прямым углом и тянутся параллельно поверхности довольно далеко, возможно даже на расстояние порядка 200 микронов. Вследствие столь значительной длины они образуют сплетение из нервных волокон, покрывающее всю поверхность обонятельного органа, обеспечивая тем самым чрезвычайно тесный контакт между молекулами пахучего вещества и собственно веществом нервных клеток.

На другом конце нервная клетка сужается и переходит в очень тонкое волокно, или аксон, направляющийся через тонкую пористую кость (решетчатая пластинка) в мозг. Поэтому каждая чувствительная клетка имеет прямую связь с обонятельной луковицей мозга, что, безусловно, интересно, поскольку именно этого мы могли бы ожидать, исходя из принципов теории информации. Кроме того, это согласовывалось бы с параллельным кодированием, или битами информации, возникающими в нервных окончаниях различных типов.

Предполагают, что существует не один тип окончаний обонятельных клеток. Наиболее важным в этом смысле является исследование, проведенное Бейдлером и Такером. Прикладывая микроэлектроды к обонятельному эпителию опоссума, они обнаружили, что пахучее вещество, вызывающее сильную реакцию одного участка этого эпителия, слабо действует на другой, тогда как иные вещества дают обратный эффект. Эти ученые не смогли изготовить достаточно тонкие электроды, чтобы иметь возможность подсоединять их только к одной клетке, но все-таки они работали с очень небольшими группами обонятельных клеток, и в этом их огромная заслуга. Кроме того, при микроскопическом исследовании была обнаружена разная окрашиваемость различных клеток, чем пользуются, в частности, гистологи, отличая одни структуры от других. Возможно, что это и указывает на присутствие в обонятельном эпителии различных типов чувствительных клеток, однако прямых доказательств до сих пор не получено. И, наконец, было найдено, что у раз-

ных обонятельных клеток палочковидные отростки (те, что несут на себе пузырьки с обонятельными волосками) отличаются друг от друга по форме. Однако, возможно, таким образом достигается просто-напросто более плотная упаковка нервных клеток обонятельного эпителия.

Итак, до сих пор все как будто ясно. Большое число чувствительных клеток, очень похожих друг на друга, хотя и не вполне идентичных, одним концом непосредственно контактируют с молекулами пахучих веществ, а на другом имеют аксон, также непосредственно связанный с обонятельной луковицей мозга. Внутри обонятельной луковицы с помощью микроскопа удастся увидеть переплетение аксонов, причем каждый заканчивается в теле так называемого клубочка.

У кролика 50 миллионов первичных обонятельных клеток с каждой стороны носа и 50 миллионов первичных аксонов, направляющихся в соответствующую обонятельную луковицу той же стороны мозга. В каждой обонятельной луковице содержится около 1900 клубочков, так что в среднем с каждым клубочком связано около 26 000 первичных обонятельных клеток.

От этих клубочков к обонятельным центрам мозга отходят другие нервные клетки, называемые митральными. У кролика, например, от каждого клубочка отходит около 24 таких клеток. Хейнер, Эмсли и Якобсон предполагают, что сигналы от большого числа (26 000) первичных обонятельных клеток 24 разных типов идут в эти клубочки и сортируются там так, что все сигналы от одного вида первичных приемников суммируются и направляются в один выходной канал. (24 митральные клетки указывают на то, что в каждый клубочек поступает 24 различных сигнала.) В настоящее время экспериментально не доказано, что обонятельный аппарат работает именно так, однако нет и доказательств, что дело обстоит как-то иначе.

Можно сказать только, что теория названных выше ученых основана на принципах передачи звука и в то же время соответствует тому, что известно о физиологии передачи нервного импульса и анатомии обонятельной системы. Кроме того, она выполняет обязательную функцию любой теории в том смысле, что намечает направления исследований, которых не было бы без этой предварительной теории.

Элементарно и неполно изложив сведения об анатомии обонятельного аппарата и представления Хейнера⁷ и соавторов о восприятии запаха с точки зрения теории информации, я опустил многие из интригующих предположений и разработок, например описание возможной физической основы закона Вебера — Фехнера.

У кролика общее число обонятельных клеток равно приблизительно ста миллионам. Если каждая из этих клеток несет 12 ресничек, или обонятельных волосков, и если эти волоски имеют в длину 100 микронов (0,01 см) и диаметр 0,15 микрона (0,000015 см), то их общая поверхность составит около 600 кв. см. Эта первичная площадь контакта между пахучими молекулами и воспринимающей поверхностью соответствует перистым антеннам насекомого. Примечательно, что эта чувствительная поверхность представляет собой обнаженное вещество самого нерва. В глазе между нервом и внешней средой есть хрусталик, в ухе — барабанная полость. Когда мы ощущаем запах, мы осуществляем наиболее непосредственный контакт с окружающим миром. Кроме того, между первичной воспринимающей поверхностью обонятельного эпителия и обонятельными центрами мозга только один синапс (в клубочке). Более прямую связь с окружающей средой трудно даже вообразить.

Сэр Вилфрид Ле Грос Кларк отмечает: «Я должен подчеркнуть, что обонятельная луковица, в которой оканчиваются обонятельные волокна, эволюционно представляет собой выдвинутую на периферию часть полушарий головного мозга, а прямая связь с ней обонятельных рецепторов является с точки зрения эволюции выражением того, что полушария головного мозга развивались у позвоночных прежде всего как орган обоняния».

Если функция мозга заключается в регуляции жизнедеятельности организма на основе полученной информации, то очень похоже, что интеллект зарождался как аппарат для обработки обонятельных сигналов от химических веществ, окружавших наших предков в первобытном океане. Если это так, тогда декартовское «Cogito ergo sum» («Я мыслю, следовательно, я существую») первоначально должно было выглядеть как «Olfacio ergo cogito» («Я чувствую запах, следовательно, я мыслю»).

Сила запаха

Однажды мне захотелось узнать, как пахнет вещество, называемое фенилацетиленом. Я взял «Органическую химию» Рихтера и на стр. 446 прочел, что это «жидкость со слабым запахом». Потом заглянул в «Органическую химию» Бернтсена и на стр. 414 обнаружил, что это «жидкость с приятным запахом». А на стр. 157 «Руководства по органической химии» Дайсона было указано, что фенилацетилен — это «бесцветная жидкость с неприятным запахом, напоминающим запах лука». Впоследствии, достав немного этого вещества, я нашел, что в большой концентрации оно пахнет, как обычные ароматические углеводороды, а при некотором разведении запах его несколько напоминает запах нитробензола. Однако результаты моих наблюдений вряд ли можно считать вполне убедительными, так как я не знаю, насколько чистым было это вещество, а сам я его не очищал.

В одной научной статье я прочел, что соединение, называемое бензилборниловым эфиром, пахнет миндалем. Заинтересовавшись, я синтезировал небольшое количество этого вещества. Оно действительно пахло миндалем, но только до тех пор, пока было недостаточно чистым; после тщательной очистки оно вообще перестало пахнуть.

Подобного рода явления довольно обычны.

В научно-технических журналах можно найти большое количество описаний запахов разнообразных веществ. Однако во многих из них, как правило, не указано, насколько тщательно очищали вещества, прежде чем определить их запах, и какое количество людей принимало участие в описании запаха. А это важно, так как очень часто люди по-разному воспринимают запах одного и того же вещества. Обычно считают, что синильная, или цианистоводородная, кислота пахнет горьким миндалем (хотя некоторые авторы детективных рассказов находят, что она пахнет фиалками). Для ряда людей (и я один из них) синильная кислота вообще не имеет запаха. Неспособность воспринимать запах этого вещества, по-видимому, передается по наследству. Это один из примеров

частичной anosмии (отсутствия обоняния). Подобные примеры довольно часто встречаются в научной литературе. Согласно Блэйкли, цветы вербены для разных людей пахнут по-разному. Было бы интересно рассмотреть более пристально наследование такой особенности обоняния в нескольких поколениях и сопоставить ее с другими физиологическими отличиями, например с группой крови или склонностью к аллергии.

Помимо наследственных различий в способности воспринимать запахи, существуют различия, связанные с физиологическим состоянием человека. Так, например, исследования Гилло во Франции показали, что вещество, названное экзалтолидом (лактон 15-оксипентадекановой кислоты), для женщин в нормальном состоянии обладает довольно сильным и несколько неприятным запахом. Однако во время беременности запах того же вещества воспринимается как слабый и приятный. Маленьким детям и мужчинам этот запах также кажется слабым, но такое восприятие можно изменить, если ввести в их организм соответствующие гормоны.

Эти интересные факты связаны, вероятно, с тем, что прием внутрь вещества, обладающего сильным и специфическим запахом, или подкожное его введение изменяют способность человека воспринимать запах этого вещества. Ньюхаус обнаружил, что если собакам дать с пищей один грамм масляной кислоты или ионона, то прежде всего резко повышается минимально ощутимая животными концентрация указанных пахучих веществ (она может возрасти в 12 раз). Впоследствии наблюдается снижение ее величины, причем в итоге пороговая концентрация вещества может уменьшиться даже в 3 раза по сравнению с обычной. Возвращение к норме у собак происходит в течение 2—3 недель, после того как им было дано исследуемое вещество. Интересно, что получение животными масляной кислоты не влияет на чувствительность их к ионону, и наоборот. Аналогичные результаты получил Ле Магнен во Франции при подкожном введении людям пахучих веществ.

Из-за всех этих осложнений (недостаточная чистота образцов, наследственные или приобретенные физиологические особенности, изменчивость запаха в зависимости от концентрации) всякого рода поверхностные описания запаха какого-либо вещества почти ничего не значат.

Все это следует учитывать при обсуждении возможной связи между запахом вещества и его химическим составом и строением, тем более что такую связь далеко не всегда удается обнаружить. Из-за того что в ряде случаев это не учитывается, до сих пор можно встретить в литературе серьезные рассуждения, основанные зачастую на весьма сомнительных фактах.

В Международных таблицах физических констант (International Critical Tables), представляющих собой подробную сводку всякого рода химических и физических величин, есть таблица пороговых концентраций запахов разных веществ. Все приведенные в таблице значения этих пороговых концентраций оказались заниженными в 100 раз. Почти наверняка эта ошибка чисто случайно проскользнула мимо внимания человека, хорошо знающего предмет, но странно то, что, хотя таблицы были опубликованы в 1926 г., до 1953 г. этого никто не заметил.

Химия запахов сама по себе настолько трудная область, что, рассказывая о ней, не следует касаться всех возможных затруднений и осложнений, иначе такое обсуждение будет слишком скучным. Поэтому я очень коротко остановлюсь лишь на некоторых вопросах связи между запахом вещества и его химическим строением.

Рассмотрим сначала, какая связь существует между силой запаха и структурой, молекулярным весом, летучестью и другими свойствами пахучего вещества.

«Сила» запаха может быть выражена различными способами. Чаще всего ее выражают через пороговую концентрацию, исходя из того, что вещества с «сильным» запахом будут пахнуть при низкой концентрации. В этом направлении была проделана очень большая работа, но в ряде случаев не вполне успешно. Дело в том, что, хотя запахи и можно обнаружить и идентифицировать (то есть узнать) при очень низких концентрациях, тем не менее порог их обнаружения не вполне совпадает с порогом идентификации. Кроме того, работа вблизи порога восприятия чрезвычайно кропотлива и трудоемка, а это мало кого привлекает. Иногда после всех злоключений, связанных с такой работой, экспериментатор запутывается окончательно. Так, например, двое исследователей, отличающихся большой тщательностью в работе, открыв однажды новую склянку с изопропиловым спиртом,

к своему великому изумлению и недоумению, обнаружили, что пороговые концентрации вещества из нее систематически отличались на 400% от ранее найденных ими данных для того же вещества, но взятого из другой банки. А ведь обе эти склянки спирта были получены ими от одного и того же изготовителя.

Измерение порога — не наилучший способ определения «силы» запаха данного вещества. Запах этилмеркаптана в зависимости от концентрации может быть и едва ощутимым, и совершенно невыносимым. Порог для мускуса или ванилина лежит значительно ниже, чем для этилмеркаптана, но, даже превысив пороговую концентрацию во много тысяч раз, запахи этих веществ не становятся чересчур сильными.

Чтобы различать эти два типа запахов, иногда используют слова «устойчивость» и «устойчивый», обозначая таким образом запахи с низким порогом восприятия, которые даже при очень высоких концентрациях не кажутся слишком сильными.

Такое изменение устойчивости можно было бы объяснить, например, различиями в величине разностного (дифференциального) порога ощущения. Чем меньше изменение раздражителя необходимо для получения минимального изменения в ощущении, тем большее количество таких единиц (JND) необходимо сложить для получения сильного запаха. Однако Гэмбл с соавторами уже давно показали, что величина минимально ощутимого различия довольно постоянна и камфара и ванилин, например, имеют, по-видимому, одинаковые значения $\frac{\Delta x}{x}$, несмотря на то что ванилин в отличие от камфары обладает одним из наиболее стойких запахов.

По системе измерения интенсивности запаха, предложенной Стивенсом (она была описана в главе VII), степень «нарастания» запаха зависит от значения константы n в формуле

$$S = x^n.$$

До сих пор по методу Стивенса было изучено лишь несколько запахов. Это были вещества со средней устойчивостью запаха, и все они характеризовались значениями n , близкими к 0,5. Можно предполагать, что систематическое исследование в указанном плане веществ

с весьма устойчивым запахом, а также веществ, имеющих очень сильный запах, могло бы дать ценные результаты.

Значительная сложность экспериментов вблизи порога восприятия заставила предложить новую, основанную на системе Стивенса методику сравнения силы запаха в концентрациях, значительно превосходящих пороговые. Чтобы понять этот способ, разберем сначала опыты другого рода.

Наблюдатель, глядя на два источника белого света, довольно легко может оценить, насколько они близки по яркости; то же самое он может сделать, сравнивая вес двух предметов, которые держит в руках; аналогично обстоит дело со сравнением силы двух электрических разрядов и т. п. Если, однако, вас просят сказать, какая из окрашенных лампочек одинакова по яркости с белой, или уловить момент, когда высокий звук приобретает одинаковую громкость с низким, то в этом случае вам уже не приходится, как раньше, сравнивать одинаковые явления. И все же опыты показывают, что даже в столь сложных обстоятельствах люди способны проводить вполне достоверные сравнения. Еще более любопытно, что такого рода сравнения (их в научной литературе называют перекрестным выбором — cross-modality match) удается осуществлять даже при сопоставлении столь не связанных между собой ощущений, как, например, громкость звука и интенсивность колебаний, ощущаемая пальцами (прикасающимися к музыкальному инструменту, например. — *Перев.*). В самом деле, опыты по осуществлению перекрестных сравнений уже проводились экспериментаторами по способу «замкнутого круга».

Такого рода сопоставление представляет собой не что иное, как развитие «метода установления пропорции» Стивенса. Если имеют место два ощущения, S_1 и S_2 (например, ощущения света и звука), которые находятся на одном уровне относительно порога, то

$$S_1 = \left(\frac{x_1}{x_0}\right)^n \quad \text{и} \quad S_2 = \left(\frac{y_1}{y_0}\right)^m.$$

Если предположить, что $S_1 = S_2$, то

$$\left(\frac{x_1}{x_0}\right)^n = \left(\frac{y_1}{y_0}\right)^m.$$

Логарифмирование этого выражения приводит к следующему:

$$\log \frac{x_1}{x_0} = \frac{m}{n} \log \frac{y_1}{y_0}.$$

То есть при одинаковых ощущениях отношения стимулов будут одинаковыми, и именно это показывают эксперименты. Действительно, опыты с перекрестным сопоставлением были проведены в первую очередь для проверки этого математического вывода на материале простого исследования отношений в пределах одной модальности ощущений.

Психологические или физиологические причины этого не известны, но если рассматривать данную закономерность в плане возникновения и передачи нервных импульсов, что описано в последней главе, то оказывается, что ничего удивительного в этом нет.

Если ощущение передается в виде залпа нервных импульсов, два ощущения, имеющие одинаковые отношения к соответствующим порогам, должны вызываться, вероятно, физически сходными залпами спайк-потенциалов. Математически, если «частота спайка» n соответствует ощущению силы I и если n и I логарифмически связаны как

$$n = a \log I,$$

$$n_0 = a \log I_0,$$

где I_0 — порог ощущения, тогда

$$n - n_0 = a \log \frac{I}{I_0}.$$

Если два разных ощущения I и J имеют одинаковые значения для $n - n_0$, то неизбежно

$$a \log \frac{I}{I_0} = b \log \frac{J}{J_0},$$

а это как раз и наблюдается при перекрестном сопоставлении.

Поэтому наблюдаемые факты могут иметь смысл в том случае, если логарифмическое соотношение $n = a \log I$ действительно существует. Не вдаваясь в подробности,

можно сказать, что как раз этого требует теория информации от канала связи, который существует для того, чтобы держать постоянным отношение сигнала к шуму, несмотря на большие изменения средней величины раздражителя.

Я вовсе не хочу сказать, что провидение устроило анатомию и физиологию нервной системы с максимальной эффективностью. Это телеологическая точка зрения, совершенно вышедшая из моды в настоящее время. Я имею в виду лишь то, что длительное действие естественного отбора приводит к выживанию и совершенствованию тех органов и систем, которые лучше всего выполняют своиственные им функции.

А теперь, вероятно, настал самый подходящий момент для того, чтобы вернуться к связи (если таковая существует) между силой запаха и химическим строением веществ.

Крюгер и соавторы в США, используя метод Стивенса, выбрали для намеченных ими опытов непредельный альдегид *n*-гептеналь, который имеет отчетливый, но весьма безвредный запах. Это соединение они могли использовать как в неразведенном виде, то есть когда оно проявляло всю силу своего запаха, так и разводя его бензилбензоатом — растворителем, совершенно лишенным запаха. Как и в опытах Стивенса, исследователи предлагали участвовавшим в опыте людям склянки, содержавшие *n*-гептеналь в разных концентрациях, для оценки силы запаха.

Испытуемых сначала специально «тренировали», предлагая им расставить растворы по порядку, от самого сильного запаха до самого слабого. После того как они научились проделывать это безошибочно, был начат следующий этап исследований: задача заключалась в необходимости сравнить силу предложенного запаха с силой другого или двух из данной стандартной серии с разными концентрациями. Эксперименты показали, что эти задачи обычно вполне выполнимы, причем результаты опытов достаточно хорошо воспроизводятся.

Используя эту методику, указанные авторы исследовали, как изменяется сила запаха в так называемом гомологическом ряду соединений некоторого данного класса; в качестве такого ряда ими были выбраны первичные алифатические спирты нормального строения:

$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2\text{OH}$	<i>n</i> -пропиловый спирт (или пропанол-1)
$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_2-\text{CH}_2\text{OH}$	<i>n</i> -бутиловый спирт (или бутанол-1)
$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_3-\text{CH}_2\text{OH}$	<i>n</i> -амиловый спирт (или пентанол-1)
.....
$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{10}-\text{CH}_2\text{OH}$	<i>n</i> -додециловый спирт (или додеканол-1)

Сначала эти вещества были предложены участвовавшим в эксперименте в неразбавленном виде с целью сравнить силу запаха чистых спиртов с силой запаха стандартного набора растворов гептеналя разной концентрации. Опыт показал, что каждый из участников более или менее справился с этой задачей, но в то же время обнаружилось и различия между показаниями разных людей, особенно при оценке силы запаха соединений, занимающих крайние положения в ряду. Так, например, двое испытуемых нашли, что запах пропанола-1 (вещества, углеводородная цепь которого построена из трех атомов углерода) слабее, чем запах высших членов взятого гомологического ряда спиртов, а один из них решил, что наиболее слабым запахом обладает додеканол-1 (содержащий в углеводородном радикале двенадцать атомов углерода). Помимо этих особенностей, во всем остальном показания испытуемых полностью согласовывались. Был сделан вывод, что сила запаха в исследуемом ряду нормальных первичных спиртов постепенно уменьшается по мере увеличения молекулярного веса.

Этот опыт повторили шесть раз, используя все более и более разведенные бензилбензоатом спирты, с тем чтобы, уменьшив силу их запаха, как можно больше приблизиться к гептеналевой шкале. Результаты еще раз подтвердили, что сила запаха в ряду спиртов (начиная с содержащего четыре атома углерода) уменьшается с увеличением их молекулярного веса.

Поскольку члены ряда, имеющие более высокий молекулярный вес, характеризуются меньшей летучестью, падение интенсивности запаха с увеличением молекулярного веса может быть вызвано просто меньшей летучестью соответствующих соединений, а следовательно, и уменьшением числа молекул, попадающих в нос. Чтобы выяснить правильность этого предположения, эксперимента-

торы разбавили исследуемые спирты бензилбензоатом, так чтобы полученные растворы спиртов имели одинаковое давление паров. Когда таким путем компенсировали уменьшение концентрации пахучих молекул в парах, оказалось, что сила запаха у членов ряда с более длинной цепью несколько выше, чем у спиртов с короткой цепью. Очевидно, что эта закономерность уже не имела бы значения при переходе к таким членам ряда с длинной цепью, как, например, эйкозанол-1 ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{18}-\text{CH}_2\text{OH}$), который не имеет запаха и практически нелетуч. По-видимому, при достаточно сильном разведении веществ, относящихся к началу ряда, когда концентрация их молекул в парах была бы столь же низкой, запах их также не удалось бы регистрировать; это, однако, требует экспериментальной проверки.

В целом на основании поставленных опытов можно сделать следующий вывод: при сопоставлении силы запаха органических соединений одного типа (то есть одного гомологического ряда) без учета давления их паров оказывается, что средние члены ряда, содержащие от пяти до восьми атомов углерода в цепи, обладают наиболее сильным запахом, тогда как низшие и высшие члены этого же ряда пахнут несколько слабее, хотя последнее, вероятно, обусловлено разными причинами.

Метод оценки силы запаха, использованный Крюгером с соавторами, может дать очень много полезных сведений и, по-видимому, будет все более широко применяться в подобных исследованиях.

Силу запаха спиртов того же ряда изучали Моултон и Эйрс. Для определения пороговых концентраций эти исследователи использовали крыс, причем пороговой концентрацией они считали ту концентрацию пахучего вещества, на которую реагировали 50% участвовавших в опыте животных. В этих опытах было найдено, что члены ряда, содержащие от 5 до 11 атомов углерода, оказывают на животных приблизительно одинаковое действие. Низшие члены ряда спиртов меньше действовали на крыс, и их пороговые концентрации были выше.

Детир и Иост, изучая действие спиртов на мясных мух (*Phormia regina*), обнаружили, что мухи избегают потока воздуха, содержащего эти спирты, причем отпугивающая концентрация спирта в воздушной струе понижается в изученном ряду (по мере увеличения молекулярного

веса вещества), до тех пор пока не наступает очередь такого члена ряда, который обладает слишком низкой летучестью, чтобы насекомые могли ощутить его запах.

Таким образом, характер изучаемой закономерности качественно вполне ясен, тем более что аналогичные исследования, проведенные с веществами других рядов, дают в общем такие же результаты. Итак:

1. Когда оценивают силу запаха чистых веществ или тех же веществ, в одинаковой степени разбавленных не имеющим запаха инертным растворителем, не внося поправок на давление паров, запах в гомологическом ряду достигает максимальной силы у веществ, обладающих цепью из пяти-шести углеродных атомов, а сила запаха последующих членов ряда уменьшается.

2. При сравнении силы запаха в гомологическом ряду в условиях одинаковой концентрации молекул пахучего вещества в парах наиболее сильным оказывается запах высших членов, но только до тех пор, пока летучесть их достаточна, чтобы зарегистрировать концентрацию молекул в парах. И в этом случае низшие члены ряда, вероятно, снова составляют исключение.

Наблюдаемые особенности, свойственные низшим членам гомологических рядов, пытались объяснить по-разному. Самое простое объяснение состоит в следующем. Для того чтобы достигнуть окончаний обонятельного нерва, молекулы пахучего вещества должны растворяться как в сильно обводненной слизистой носа, так и в жироподобных (липидных) веществах, из которых состоят оболочки клеток обонятельного аппарата. Первые три члена гомологического ряда спиртов смешиваются с водой во всех отношениях, а растворимость в воде остальных спиртов довольно ограничена. Именно это, возможно, определяет легкий доступ молекул пахучего вещества к мембранам нервных клеток обонятельного аппарата.

Таким образом, мы располагаем двумя различными и четкими критериями «силы» запаха: первый — низкий порог и второй — резкое усиление запаха, после того как этот порог пройден. Показатель степени n в формуле Стивенса может оказаться очень удобной мерой оценки силы запаха по второму из этих критериев; это, однако, еще требует доказательства, вследствие чего теоретическую интерпретацию смысла этого показателя степени

придется пока отложить. Что касается порогов обоняния, то здесь положение несколько лучше. Этот вопрос теоретически разработали Дэвис и Тэйлор, причем очень интересно. В связи с важностью данной проблемы рассмотрим ее подробнее.

Запахи воспринимаются в том случае, если молекулы пахучего вещества на какое-то время непосредственно соприкасаются с клеточной мембраной. С этого и начинаются рассуждения Дэвиса и Тэйлора. Клеточная мембрана (или оболочка клетки) имеет, по-видимому, жироподобную, или липидную, природу, но она покрыта водянистым слоем слизи. Поэтому молекулы пахучего вещества из воздуха прежде всего должны перейти в водно-липидный пограничный слой. Дэвис и Тэйлор предполагают, что в этом случае действует так называемый закон распределения, известный из физической химии, согласно которому

$$\frac{C_1}{C_a} = K_{1/a},$$

где C_1 — средняя концентрация молекул пахучего вещества на поверхности клеток, C_a — концентрация этих молекул в окружающем воздухе, а $K_{1/a}$ — постоянная, называемая коэффициентом распределения, который зависит от природы распределяющегося в разных фазах вещества, но для данного вещества является постоянной величиной независимо от величины значения C_a .

Концентрация C_1 означает концентрацию пахучего вещества в поверхностном слое, выраженную числом молекул в кубическом сантиметре вещества, из которого состоит этот слой. Для того чтобы перевести эту величину в число молекул в 1 кв. см поверхности клетки, Дэвис и Тэйлор предполагают, что толщина поверхностного слоя d около одного миллимикрона (10^{-6} мм), так что среднее число молекул, приходящихся на 1 кв. см поверхности, составляет $C_{1/d}$.

Эти молекулы распределены на клеточной поверхности столь же неравномерно, как горсть горошин, брошенная на землю. Иначе говоря, распределение молекул на поверхности носит случайный характер, то есть имеются места, где плотность адсорбированных молекул выше средней, и наоборот. Предполагается, что, когда на данном участке поверхности клетки плотность адсорбированных молекул

превысит некоторую величину, эти молекулы каким-то образом деполаризуют, или, если так можно выразиться, «пробивают», клеточную мембрану. При этом молекулы одних типов имеют повышенную «пробивную» способность по сравнению с молекулами других типов. Чтобы перевести эти весьма общие рассуждения на язык математики, представим себе, что поверхность клеточной мембраны разделена на маленькие гнезда, которые настолько малы, что при случайном распределении молекул пахучего вещества по всей поверхности количество молекул в каждом из этих гнезд также чисто случайно.

Это сводит нашу проблему к обычной задаче из области теории вероятностей, причем для ее решения существует готовая формула — уравнение Пуассона:

$$\frac{N}{n} = \frac{e^{-aC_1}(aC_1)^p}{p!}.$$

В этой формуле a — площадь одного участка; произведение aC_1 — среднее число молекул, приходящихся на один участок; N — количество участков, содержащих число молекул p , превышающее среднее число молекул, приходящихся на один участок (aC_1), и n — общее количество участков на поверхности данной клетки.

Для того чтобы вызвать нервный импульс, необходимо, чтобы по крайней мере один из участков мембраны нервной клетки имел некоторое критическое число молекул, так что наименьшее значение N равно 1. Кроме того, наименьшее возможное число молекул пахучего вещества, приходящееся на один такой участок, должно быть равно 1. (Это может быть в случае вещества с сильным запахом, молекулы которого обладают максимальной пробивной способностью.) Для слабо пахучих веществ критическое число молекул, приходящихся на один участок, может составлять 20 или 30. Если объединить формулу закона распределения с формулой Пуассона и вместо буквенных обозначений вставить числовые значения констант, то обычные математические преобразования приводят к следующему выражению:

$$\log \text{П. О.} + \log K_{1/a} = \frac{-4,64}{p} + \frac{\log p!}{p} + 21,19.$$

Если сделанные предположения верны и известны значения коэффициента распределения и величины p , можно вычислить величину порога обоняния (П.О.), поль-

зуюсь полученным уравнением. Значение коэффициента распределения $K_{1/a}$ для каждого вещества можно определить путем непосредственных измерений распределения пахучего вещества между маслом (или жиром) и водой и между водой и воздухом.

Значение величины p найти гораздо труднее, так как мы не знаем, каким образом молекулы пахучего вещества взаимодействуют с поверхностью клеточной мембраны, «пробивая» ее. (Некоторые современные теории на этот счет будут рассмотрены в следующей главе.) Дэвис и Тэйлор считают, что значение величины p зависит, по крайней мере частично, от размера и формы молекул пахучего вещества. Эти авторы полагают, в частности, что столь «изящная» молекула, как, например, молекула воды, не обладает пробивной способностью по отношению к мембране нервной клетки (и именно поэтому вода не имеет запаха), а «толстая» молекула, например молекула β -иона, имеет максимальную пробивную способность (поэтому у иона одна из самых низких пороговых концентраций); по мнению Дэвиса и Тэйлора, у веществ, промежуточных по силе запаха, пробивная способность прямо пропорциональна площади поперечного сечения их молекул.

Из экспериментов совершенно иного рода мы знаем кое-что о размере и форме различных молекул, хотя в ряде случаев мы можем только предполагать, находится ли нитевидная молекула с длинной цепью в скрученном состоянии или она вытянута. Для большей достоверности Дэвис и Тэйлор рассчитали оба варианта. Для первичных алифатических спиртов нормального строения (опыты с которыми мы подробно обсуждали выше) они вычислили величины пороговых концентраций, предполагая, что молекулы этих веществ могут иметь как скрученную, так и вытянутую конфигурацию. Полученные ими значения пороговых концентраций очень интересно сравнить с экспериментально найденными величинами (соответствующие данные приведены в таблицах). Если учесть трудность экспериментальной проверки обсуждаемой проблемы, а также тот факт, что при теоретическом ее рассмотрении был сделан ряд весьма грубых и приблизительных допущений, расчетные данные Дэвиса и Тэйлора хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными другими исследователями. Интересно отметить,

Вычисленные и экспериментально наблюдаемые значения пороговых концентраций для алифатических первичных спиртов
Пороговая концентрация (молекулы в 1 куб. см)

Спирт	Вычислено (Дэвис и Тэйлор)		Человек (разные исследователи)	Крыса (Моултон и Эйрс)	Мясная муха (Детир и Иост)
	скрученная молекула	вытянутая молекула			
C_3H_7OH	5×10^{13}	3×10^{14}	5×10^{13}	6×10^{14}	3×10^{16}
C_4H_9OH	8×10^{12}	1×10^{14}	8×10^{12}	3×10^{13}	4×10^{15}
$C_5H_{11}OH$	1×10^{12}	2×10^{13}	7×10^{12}	1×10^{12}	1×10^{15}
$C_6H_{13}OH$	1×10^{11}	8×10^{12}	7×10^{12}	2×10^{12}	2×10^{14}
$C_7H_{15}OH$	5×10^{10}	6×10^{12}	9×10^{11}	9×10^{11}	2×10^{14}
$C_8H_{17}OH$	4×10^9	1×10^{12}	3×10^{10}	7×10^{10}	1×10^{15}
$C_{10}H_{21}OH$	1×10^8	3×10^{11}	4×10^{11}	8×10^9	3×10^{14}

Вычисленные и экспериментально наблюдаемые значения пороговых концентраций для человека и собаки
Пороговая концентрация (молекулы в 1 куб. см)

	Вычисленная (Дэвис и Тэйлор)		Наблюдаемая	
	скрученная молекула	вытянутая молекула	человек	собака
Масляная кислота	1×10^{10}	1×10^{11}	1×10^{11}	9×10^3
Валериановая кислота	1×10^{10}	4×10^{11}	1×10^{11}	4×10^4
Капроновая кислота	3×10^9	2×10^{11}	1×10^{12}	4×10^4
α -Ионон	2×10^8	2×10^8	2×10^8	7×10^4

что мясные мухи оказались менее чувствительными, чем можно было предполагать.

Несколько озадачивает сопоставление расчетных величин с наблюдаемыми значениями пороговых концентраций некоторых веществ для собак. В главе VII я отмечал, что некоторые пороговые значения для собак примерно в 100 раз ниже, чем для человека. В таких случаях и человек и собака, вероятно, могут ощущать одни и те же запахи. Кроме того, есть вещества, у которых пороговые

концентрации для людей более чем в миллион раз превышают соответствующие величины для собак, и в таких случаях собаки, по-видимому, чувствуют то, чего мы уже не воспринимаем. Величины пороговых концентраций, вычисленные Дэвисом и Тэйлором, как и следовало ожидать, достаточно хорошо совпадают с пороговыми значениями их для людей и соответствующими им значениями для собак, однако это соответствие исчезает в случае таких веществ, у которых пороговые концентрации для собак очень низки. Я не считаю, что факты такого рода опровергают теорию Дэвиса и Тэйлора; они лишь показывают, что «пробивная» способность молекул может зависеть не только от «изящества» или «толщины» молекулы пахучего вещества.

Загадка химии

Однажды я попросил знакомого химика понюхать два вещества, которые, по мнению большинства людей, пахли очень похоже, и сказать, что он думает по этому поводу. Он старательно исполнил мою просьбу и уверенно заявил, что пахнут они совершенно по-разному, что он легко может различить эти вещества по запаху и, следовательно, между ними нет ничего общего. По его буквальному выражению, в запахах этих веществ не было ничего такого, что могло бы их как-то объединять, одинакового и неотличимого. Это, разумеется, неверное утверждение: при сравнении запахов в большинстве случаев мы обнаруживаем у них какие-то общие особенности.

Если я говорю, что два вещества имеют цветочный запах, это значит, что я считаю их запахи похожими настолько, насколько запах фиалки, например, похож на запах розы. Тем не менее вряд ли кто-нибудь спутает эти два запаха, хотя запах фиалки похож на запах розы более, чем он похож, скажем, на запах рыбы. Попробуем еще сузить понятия. Если я говорю, что оба вещества имеют «розоводобные» запахи, я вовсе не имею в виду, что они неразличимы между собой, что их запах неотличим от запаха розы. Я просто считаю, что между ними есть значительное, но вовсе не абсолютное сходство. Надеюсь, в данном случае я не занимаюсь доказательством очевидного, хотя мне приходилось делать это довольно часто из опасения быть понятым неправильно.

Попробуем рассмотреть эту же проблему в другом аспекте.

Сто лет назад Кекуле изобретением структурных формул заложил основы современной органической химии¹.

¹ А. Кекуле в Германии (в также А. Купер в Англии), несомненно, внесли существенный вклад в создание структурной теории, разработав некоторые ее элементы, но истинным творцом теории химического строения является знаменитый русский ученый А. М. Бутлеров (1828—1886). Созданная им теория является научной основой современной органической химии, и именно о ее использовании говорит далее автор настоящей книги (см., например,

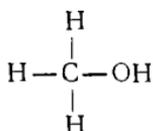
Он внес новое в уже существовавшие тогда атомистическую и молекулярную теории, предположив, что атомы в молекулах не всегда соединяются с отличными от них атомами (как, например, в молекулах $\text{H}-\text{Cl}$ или $\text{Ca}=\text{O}$), а могут также соединяться *между собой*, образуя «цепочки», и что эта способность особенно ярко выражена у атомов углерода. Приняв это за основу, он и его последователи создали замечательную структурную теорию на основе изучения химических свойств органических соединений. В результате таких исследований ученые получают структурные формулы веществ, в которых очень наглядно представлены свойства данного соединения. Позвольте мне продемонстрировать это на простом примере.

Предположим, что имеется бесцветная жидкость, количественный состав и молекулярный вес которой соответствуют формуле CH_4O . Это соединение реагирует с большим количеством разнообразных веществ, и из всех этих реакций я выберу две наиболее важные в плане разрешения поставленной задачи. Во-первых, если в эту жидкость внести маленький кусочек натрия, она начинает пузыриться и в результате бурной реакции выделяется водород. Натрий постепенно растворяется, а из образовавшегося раствора можно выделить твердое белое вещество, которому соответствует формула NaCH_3O . Дальше этой стадии реакция не идет, поскольку соединения с формулой $\text{Na}_2\text{CH}_2\text{O}$ не существует. Таким образом, в исходном веществе с общей формулой CH_4O только один из четырех атомов водорода в молекуле может заместиться на атом натрия, тогда как три других атома водорода не могут вступить в эту реакцию. Таким образом, один из четырех атомов водорода в некотором роде уникален или по крайней мере чем-то отличается от остальных. Вторая важная для наших целей реакция — это реакция с треххлористым фосфором. В результате этой реакции наше исходное вещество с формулой CH_4O превращается в соединение CH_3Cl , причем важно еще то, что полученное вещество CH_3Cl уже не содержит атома водорода, способного заместиться на атом натрия.

Итак, в веществе CH_4O один из атомов водорода чем-то отличается от остальных, причем этот атом водорода вместе с атомом кислорода можно заместить на один атом хлора.

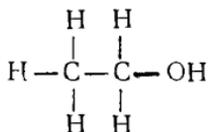
А. Е. Ч и ч и б а б и н, Основные начала органической химии, т. I, ГХИ, 1963, стр. 46—83).— *Прим. перев.*

Из курса общей химии нам известно, что способность атомов соединяться друг с другом определяется валентностью. Валентность водорода равна 1, кислорода — 2, углерода — 4 (эти элементы почти всегда проявляют указанные валентности). Валентность хлора обычно равна 1, хотя в некоторых соединениях может меняться. Простейший способ изобразить свойства нашего вещества в соответствии с валентностями составляющих его атомов — написать его структурную формулу:



Формула показывает, что один из атомов водорода отличается от других: он связан с атомом кислорода, тогда как три других связаны непосредственно с атомом углерода. Именно этот «особенный» атом водорода вместе со связанным с ним атомом кислорода создают группу атомов, которую можно удалить и заместить на одновалентный атом хлора.

Если мы теперь перейдем к другому веществу, $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, которое с металлическим натрием и треххлористым фосфором реагирует совершенно аналогично первому, то мы имеем полное право приписать ему следующую структурную формулу:



(Вспомним о способности углеродных атомов образовывать цепочки.)

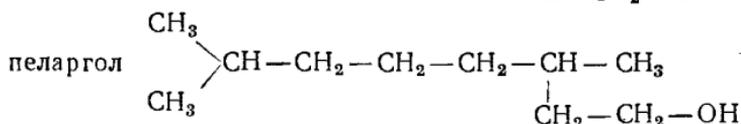
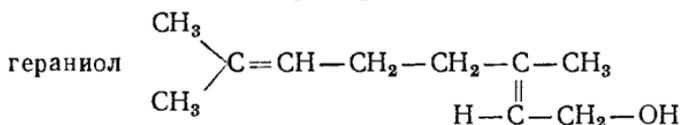
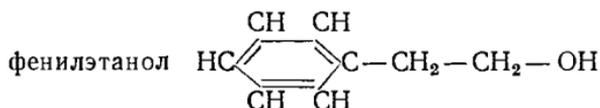
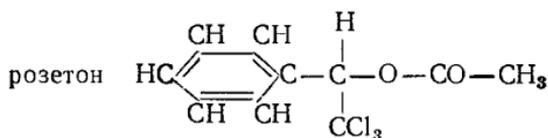
Этот ряд можно продолжить; действительно, в предыдущей главе мы уделили очень много внимания главным образом высшим членам этого семейства, или «гомологического ряда», нормальных первичных алифатических спиртов. («Нормальных», — потому что цепи их не разветвлены, «первичных», — потому что гидроксильная OH-группа находится у концевых атомов цепи, а «алифатических», — потому что углеродные цепи этих молекул не образуют колец, или циклов.)

Пожалуй, у нас получилась слишком длинная преамбула к обсуждению возможной связи запаха с химиче-

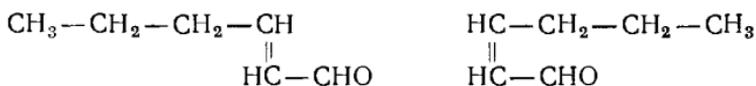
ским строением вещества, однако я считаю, что, для того чтобы остальная часть главы имела смысл, необходимо разобраться, с одной стороны, в структурной формуле, а с другой — в том, какие выводы о свойствах вещества можно сделать, исходя из его структурной формулы. Структура молекулы устанавливается на основании химических свойств вещества, и, хотя удобнее говорить, что спирт ведет себя в разных реакциях определенным образом «потому, что содержит ОН-группу», в действительности мы подразумеваем, что он содержит ОН-группу потому, что реагирует определенным образом.

Исключительный успех структурной органической химии был обусловлен тем, что стало возможно систематически связывать химические свойства веществ с их структурой. Кроме того, оказывается, что многие физические свойства (например, оптическая рефракция) и даже некоторые фармакологические также обнаруживают связь со структурой молекул.

Однако такого рода связь удается найти далеко не во всех случаях. Так, например, если говорить о запахах, то зачастую не существует сколько-нибудь закономерной связи запаха со структурой молекулы данного вещества. Вещества с различными молекулярными структурами могут иметь подобные, или сходные, запахи (всегда следует помнить, что «подобный», или «сходный», совершенно не обязательно означает «идентичный»). Вот, например, вещества, имеющие «розоводный» запах:



Согласно их описанию, вещество, имеющее *цис*-конфигурацию, обладало «запахом, очень похожим на запах свежей зелени», а запах *транс*-соединения ничего общего с ним не имел. Запахи обоих этих веществ в свою очередь отличались от запахов соответствующих аналогов, в молекулах которых двойная связь была сдвинута по цепи:



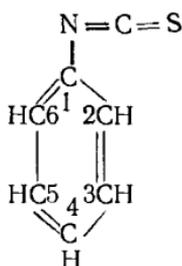
Эти примеры, по существу, случайно выхвачены из огромного количества опубликованных научных работ. Они иллюстрируют лишь тот факт, что не всегда удается обнаружить связь запаха с химическим строением вещества, но эти примеры явно недостаточно полны и слишком случайны для демонстрации сложности проблемы, с которой мы столкнулись.

Несколько лет назад Дайсон провел систематическое исследование группы веществ, известных под названием фенилгорчичных масел. Эту работу во многом можно считать образцом подхода к решению такого рода проблем. (Единственное, чего не хватало в исследовании Дайсона, — это жюри для оценки запахов. Возможно, что такое жюри и существовало, однако в своих публикациях он ничего об этом не говорит.)

Вещество, называемое горчичным маслом, имеющее химическое название «аллилизотиоцианат» и формулу

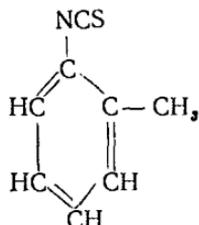


можно выделить из семян горчицы, и именно его присутствием обусловлены характерный запах и вкус горчицы. Фенилгорчичное масло — это чисто синтетическое вещество с несколько подобным запахом; оно имеет следующее строение:

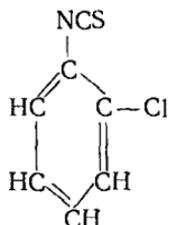


Дайсон начал с того, что синтезировал ряд соединений, в основе которых лежит структура фенилгорчичного

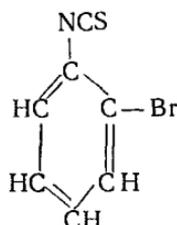
масла, а в кольце имеется еще какой-либо заместитель.
Вот эти соединения и их запахи:



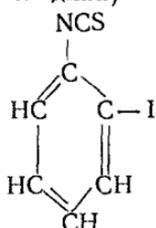
(похож на запах
фенилгорчичного
масла, но несколько
более сладкий)



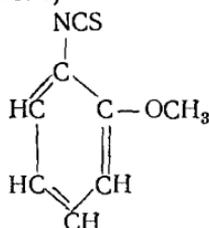
(очень похож на
запах фенил-
горчичного
масла)



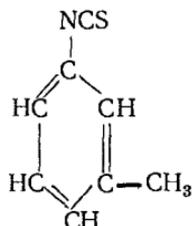
(менее острый,
похож на
запах аниса)



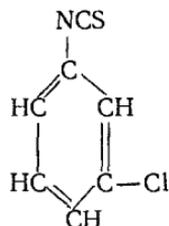
(сладкий,
подобный
запаху аниса)



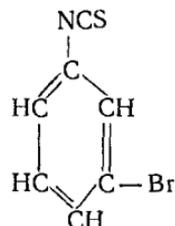
(резкий, острый)



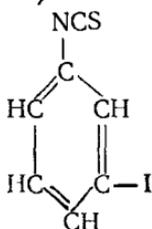
(более острый, чем
у фенилгорчичного
масла)



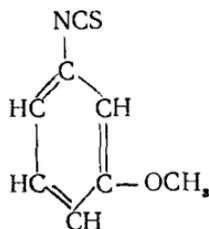
(очень острый)



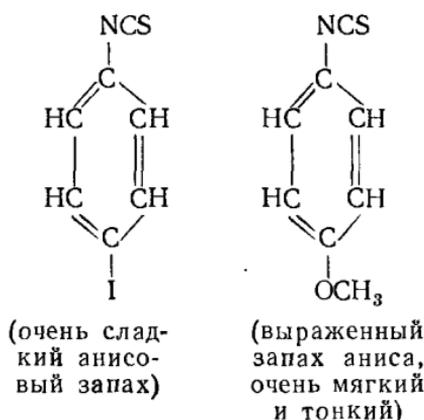
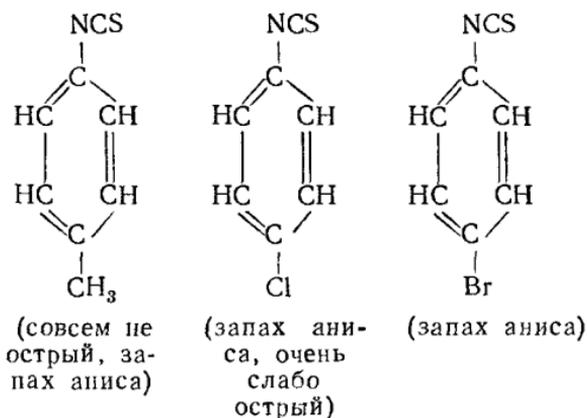
(слабо острый)



(очень слабо ост-
рый, похож на
запах аниса)



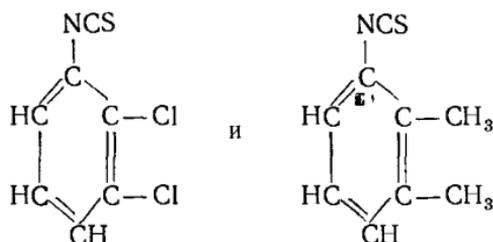
(резкий, острый)



Из всех этих результатов Дайсон сделал следующий вывод. В то время как родоначальное вещество — горчичное масло — имеет острый запах, наличие заместителя в положении 2 (рядом с изотиоцианатной группой) делает запах соответствующего вещества несколько более сладким, придавая ему цветочный характер, причем природа находящегося в положении 2 цикла заместителя особого значения не имеет. Наличие заместителя в положении 3 (то есть у третьего углеродного атома) усиливает остроту запаха вещества, а присутствие какой-либо группы в положении 4 (то есть у четвертого атома углерода) приводит к уничтожению остроты запаха, и он становится похожим на запах аниса.

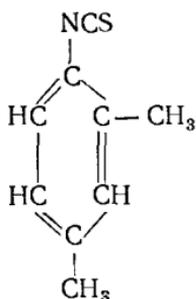
Сделав эти выводы, Дайсон попробовал ввести в основную структуру фенилгорчичного масла сразу две группы.

В результате он обнаружил, что найденная закономерность при этом также сохраняется. Так, например, оба следующих двузамещенных фенилизотианата:

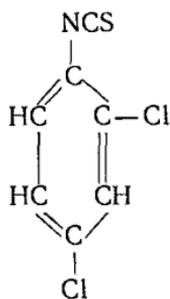


имеют острые запахи, но мягче, чем у собственно фенилгорчичного масла, вследствие модифицирующего влияния на запах заместителя в положении 2 фенильного кольца.

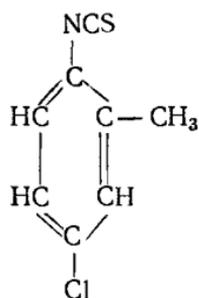
Особенно интересные примеры суммирования действия заместителей дают следующие вещества:



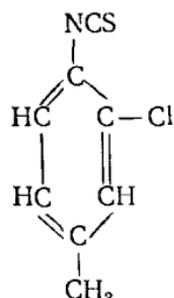
(довольно
нежный за-
пах аниса)



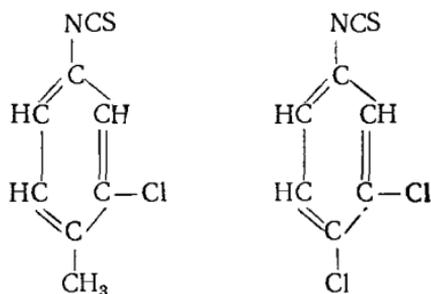
(сладкий за-
пах аниса)



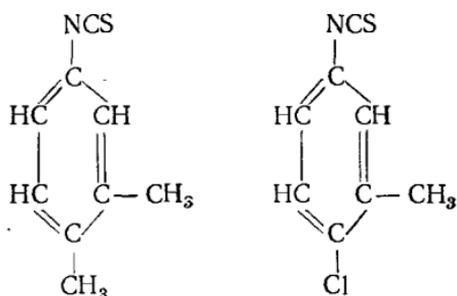
(отчетливый за-
пах аниса)



(нежный запах
таволги)

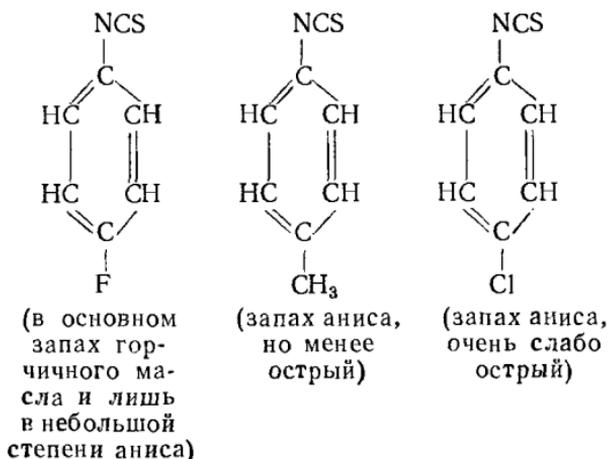


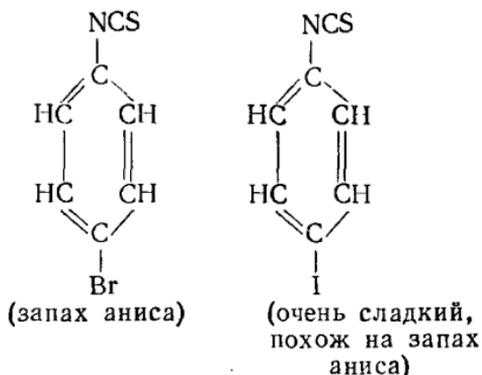
(запах аниса, но довольно острый)



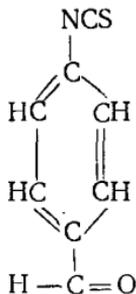
(запах аниса, но менее острый)

В результате всех этих наблюдений подтвердилась правильность предварительно сделанных обобщений и, кроме того, было выяснено, что атом хлора в качестве заместителя воздействует на характер запаха фенилгорчичного масла значительно сильнее, чем метильная ($-\text{CH}_3$) группа; точнее говоря, эффект хлора доминирует над эффектом метила. Это доминирование наглядно выступает при рассмотрении следующего ряда соединений:

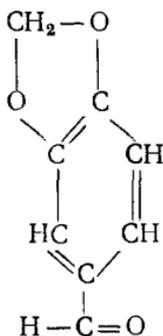




Приведенные выводы имеют довольно общий характер. Дайсон нашел также, что анисоподобный запах имеют соединения, у которых в положении 4 фенильного цикла находятся группы $-\text{CN}$, $-\text{OCH}_3$, $-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$. Однако эта закономерность не беспредельна, и вещество с формулой



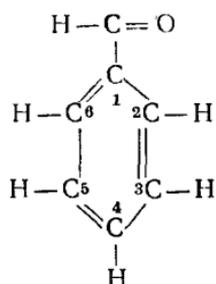
пахнет подобно соединению



А это уже не что иное, как гелиотропин.

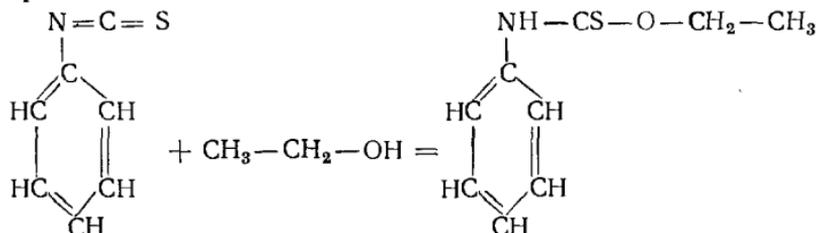
Последовательные и закономерные изменения запаха, наблюдаемые в данной группе веществ, носят (для экспериментов такого рода) необыкновенно систематический характер, но найденные при этом зависимости вряд ли можно применить к соединениям других рядов или групп.

В самом деле, бензальдегид, например, с формулой



имеет запах, похожий на запах миндаля, но это вещество не удалось подвергнуть столь же закономерным видоизменениям путем введения в цикл различных заместителей (хотя мне не известно, предпринимал ли какой-нибудь химик такое систематическое и всестороннее изучение замещенных бензальдегидов, как Дайсон — фенолгорчичных масел). Единственное обобщение, которое можно сделать на основании множества исследований, таково: в ряду производных бензола введение нового заместителя в положение 4 (по отношению к некоторой группе, уже имеющейся в бензольном кольце) оказывает большее влияние на характер запаха вещества, чем введение того же заместителя в положение 2 или 3. Но, если запах не коррелирует с присутствием каких-то определенных атомов или групп атомов в молекуле, связан ли он как-нибудь с общей химической активностью вещества?

Наиболее активной или реакционноспособной группой в молекулах горчичных масел является изотиоцианатная группа ($-\text{N}=\text{C}=\text{S}$). Она, например, как показывает приведенное ниже уравнение, довольно легко реагирует со спиртами



Дайсон измерил скорости этой реакции для различных производных фенолгорчичного масла, надеясь обнаружить какую-нибудь связь между этой скоростью и запахом реагирующего вещества, но никаких результатов это

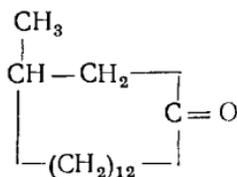
не дало. Некоторые вещества, обладающие острым запахом, реагировали со спиртом быстро, а другие, с таким же запахом, — медленно; так же обстояло дело для разных производных, имеющих запах аниса.

Результаты своих исследований Дайсон суммировал в таком категорическом заявлении: «Из экспериментальных данных, описанных в этих статьях, следует, что нет никаких оснований, как с точки зрения реакционной способности, так и химического строения, которые дали бы нам ключ к рациональной, количественной интерпретации феномена запаха». Это было тридцать лет назад, но и по сей день ситуация не изменилась.

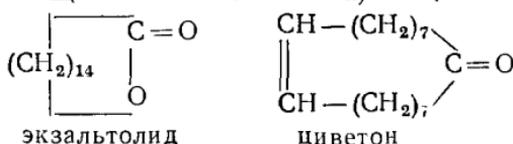
Характерно, что работы Дайсона имели совершенно отчетливую направленность: он изучал, как изменяется некоторый первичный запах при определенных изменениях основной структуры молекулы.

Известны также эксперименты обратной направленности, для которых отбирали вещества, обладающие запахом одного и того же типа, но с весьма различной структурой. Осуществление этих исследований, особенно интенсивно проводившихся с запахом мускуса, привело к тому, что было обнаружено по крайней мере пять различных типов молекул, имеющих мускусный запах.

Натуральный мускус представляет собой продукт животного происхождения, который в качестве активного компонента содержит так называемый мускон, имеющий структуру

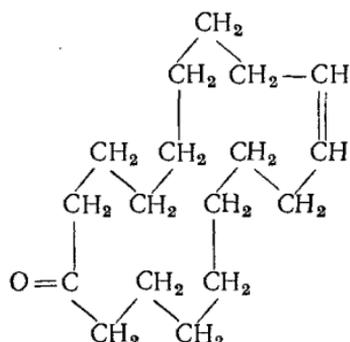


Эта молекула представляет собой замкнутый цикл, или кольцо, в которое входят пятнадцать атомов углерода, и относится к классу «макроциклических» соединений, или соединений «с большими циклами». Мускусным запахом обладают также многие другие макроциклические соединения, например экзальтолид (о нем мы уже упоминали в главе, посвященной силе запаха) и циветон

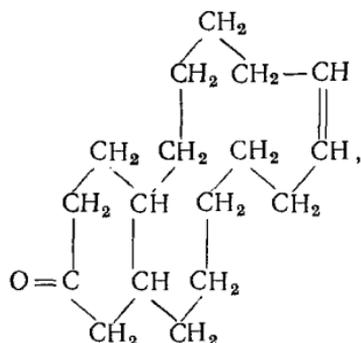


мускусный запах, причем наличие его в большой степени зависит от незначительных изменений в структуре.

Если убрать внутренние связи, которые делают стерин системой из конденсированных циклов, и внести еще одно-два небольших изменения в структуру, получится вещество с такой формулой:



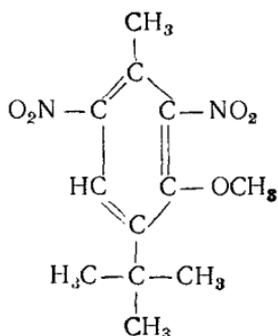
Подсчитав число звеньев в образовавшемся цикле, увидим, что это не что иное, как макроциклический мускус — циветон. Возможно, это просто удачное, но случайное совпадение, однако более вероятно, что в данном случае мы имеем нечто большее, чем просто совпадение, потому что другое соединение



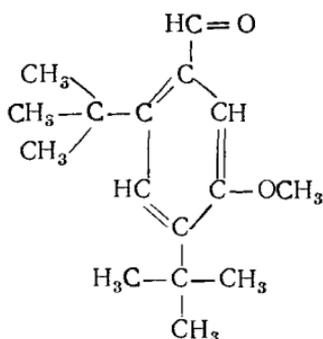
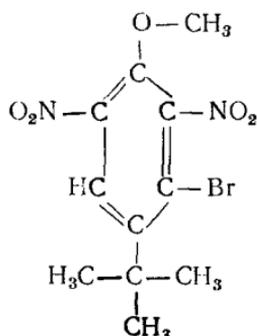
в котором в отличие от предыдущего сохранена одна из внутренних поперечных связей, также обладает мускусоподобным запахом.

Еще одну, на этот раз совершенно отличную группу веществ, имеющих важное практическое значение, представляют соединения, называемые нитромускусами. Ниже

приведены некоторые типичные формулы этих веществ:



амбровый мускус



В последнем соединении нет нитрогруппы, но тем не менее оно явно относится к тому же классу.

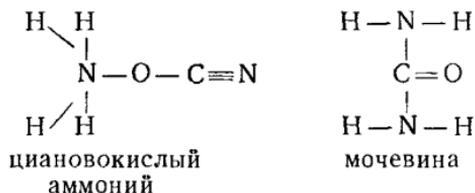
Помимо перечисленных выше вполне определенных групп веществ, обладающих мускусоподобным запахом, но, кроме этого, имеющих очень мало общего между собой, в научных и технических журналах попадаются иногда указания и на другие типы химических соединений, которым в той или иной мере свойствен этот же запах. Поэтому, очевидно, от чего бы ни зависел мускусный запах, он не связан ни с определенным типом молекулярной структуры, ни с реакционной способностью вещества. Вероятно, ощущение мускусного запаха можно вызвать самыми разнообразными способами. Некоторые из них мы рассмотрим в последующих главах. А сейчас, по нашему мнению, вполне уместно повторить вслед за Дайсоном его вывод: ни химическая структура, ни химическая активность не могут быть ключом к пониманию явления, именуемого запахом вещества.

Изомерия

Без теории химического строения в органической химии трудно было бы понять очень сложное явление, известное под названием изомерии. Существуют вещества, молекулы которых содержат одно и то же число одних и тех же атомов, а следовательно, им соответствует одна и та же формула, и все же это разные вещества. Они получили название изомеров, или изомерных соединений.

Один из давно известных примеров явления изомерии — следующая пара веществ: циановокислый аммоний, который всегда считали веществом неорганическим на основании способа его получения (из циановокислого серебра и хлористого аммония), и мочевина, которую относили к органическим веществам, так как она представляет собой продукт жизнедеятельности живого организма. Обоим этим веществам соответствует формула $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, однако их растворимость, форма кристаллов и ряд других свойств совершенно различны. Эти продукты являются изомерными соединениями. (Именно эти изомерные вещества знамениты еще и потому, что в 1828 г. Велер открыл возможность превращения циановокислого аммония в мочевину, то есть впервые показал, что органическое соединение можно получить из неорганических исходных веществ без участия живого организма. Но это уже не относится к нашему предмету.)

Не будь теории химического строения, существование изомеров сделало бы химию гораздо более сложной наукой. Действительно, только на основании этой теории указанные вещества легко можно изобразить следующим образом:



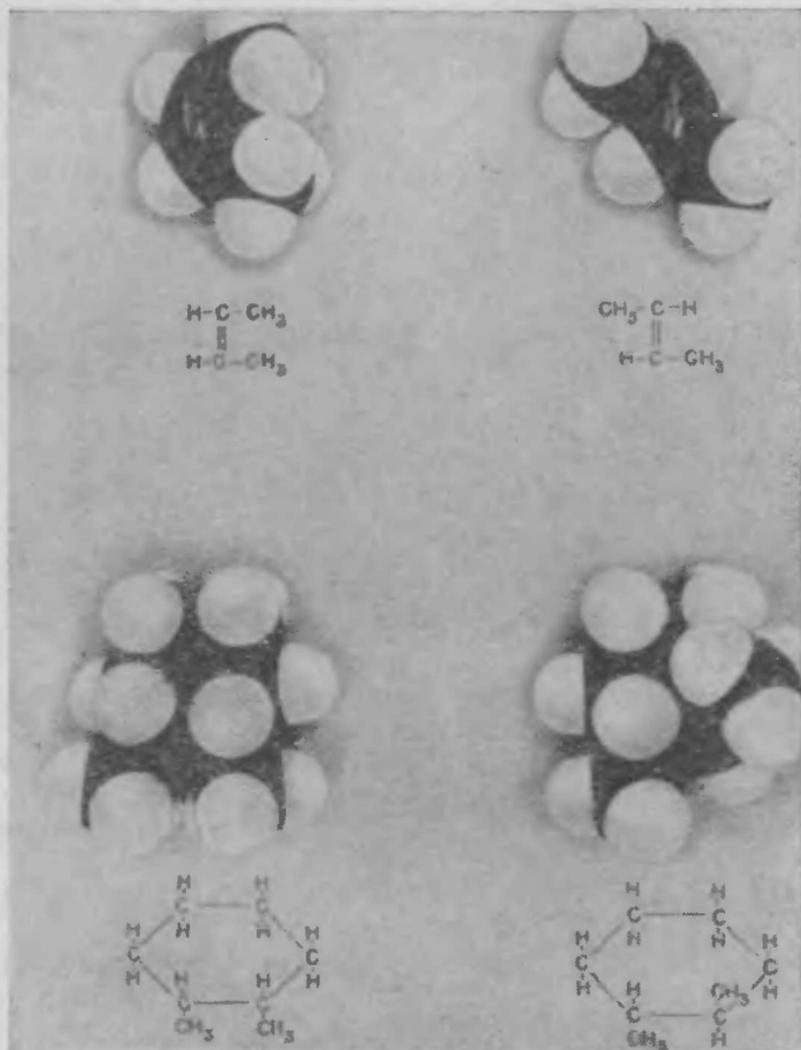
Именно теория химического строения помогает объяснить все известные в настоящее время случаи изомерии.

С двумя видами изомерии мы уже встречались. Речь идет о структурной изомерии, или изомерии положения; примером могут служить изомерные производные фенилгорчичных масел, которые изучал Дайсон. В молекуле фенилгорчичных масел заместитель может находиться в положении 2, 3 или 4 по отношению к положению в бензольном ядре изотиоцианатной группы. Второй важный вид изомерии — так называемая *цис, транс*-изомерия, связанная с появлением жесткости в молекуле (двойных связей или циклических структур) (фиг. 15). В этих случаях одни и те же группы могут быть соединены с одними и теми же атомами молекулы, но по-разному располагаться в пространстве. *Цис, транс*-изомерия, таким образом, является стереоизомерией, поскольку зависит от различий в пространственном расположении атомов или групп в молекуле.

Однако *цис, транс*-изомерия — не единственный вид стереоизомерии. Существует другой вид, тоньше и сложнее, более распространенный и гораздо более важный, чем *цис, транс*-изомерия. Этот вид изомерии был открыт Пастером сто лет назад, а вскоре Вант-Гофф и Ле-Бель независимо друг от друга объяснили это явление.

Этот третий вид изомерии называют оптической изомерией, потому что в простейших случаях она проявляется только в небольших различиях оптических свойств двух изомерных веществ, а почти все их химические и физические свойства одинаковы.

Явление оптической изомерии может наблюдаться при наличии в молекуле углеродного атома, связанного с четырьмя различными атомами или группами атомов. Если четыре валентности углеродного атома направлены в пространстве так, что образуют друг с другом равные углы, то возможны две разные последовательности присоединения к этому углеродному атому четырех неодинаковых заместителей. Чтобы наглядно представить себе такую возможность, надо это нарисовать, а еще лучше воспользоваться моделями. Заслуга Вант-Гоффа и Ле-Беля как раз и заключается в том, что они давно поняли необходимость присутствия в оптических изомерах по крайней мере одного атома углерода, по-разному соединенного с четырьмя различными заместителями.



Ф и г. 15. Эти модели изображают изомерные *цис*- и *транс*-формы 2-бутена и 1,2-диметилциклогексана. Существование этих изомеров обусловлено структурной жесткостью молекул, создаваемой присутствием в них соответственно двойной связи и циклической структуры. По сравнению с такими моделями структурные формулы очень приблизительны, но они дают гораздо лучшее представление о том, каким образом может быть построена данная молекула.

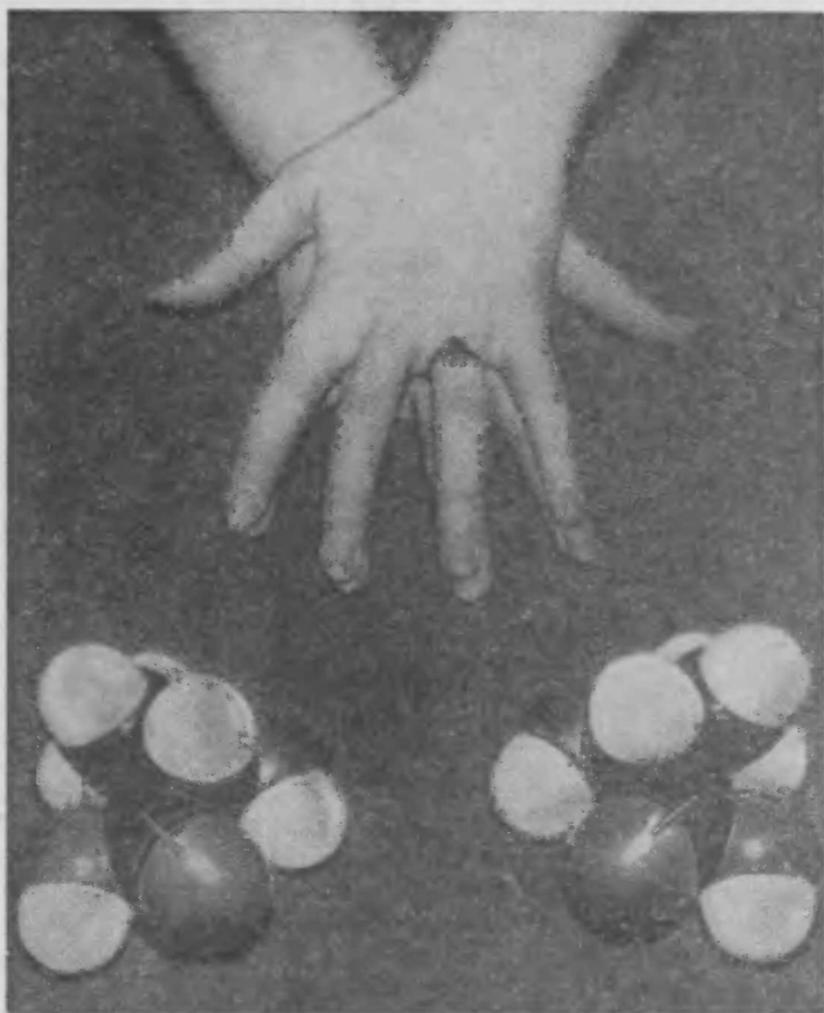
Когда с одним углеродным атомом связаны четыре разных заместителя, такая молекула может существовать в двух формах, которые относятся друг к другу, как левая рука к правой (фиг. 16). Составляющие части одинаковы, строение одинаково, работу они могут выполнять одинаковую, а в целом правая и левая руки все-таки неодинаковы, потому что их нельзя наложить друг на друга так, чтобы они совпали по всем точкам. Иначе говоря, они несовместимы, потому что асимметричны. Углеродный атом с четырьмя различными заместителями представляет собой асимметричный углеродный атом, а молекула, содержащая такой атом углерода, может существовать в двух «зеркальных» формах.

В большинстве случаев асимметрия для химии значения не имеет. Ведь левая рука может делать все, что делает правая, за одним существенным исключением: на левую руку нельзя надеть перчатку с правой руки.

Аналогично этому «молекула-левша» будет делать все то же самое, что и ее «правый двойник (или, как говорят ученые, энантиоморф), но лишь до тех пор, пока ей не придется вступить в реакцию с другой асимметричной молекулой. В этом случае проявляется различие: «правый-А» реагирует с «правым-Б» не так, как он реагирует с «левым-Б».

Очень сложное строение большинства веществ биологического происхождения создает неограниченные возможности для появления изомерии такого типа. Интересно и чрезвычайно важно то обстоятельство, что в процессе жизнедеятельности организмы создают и используют обычно только один из двух возможных изомеров. Более того, все живое на земле, от крохотной былики до огромного слона, имеет один и тот же определенный вид симметрии.

То, что жизнь во всем своем многообразии укладывается в один тип симметрии, связано, по-видимому, с развитием всего живого из единого исходного прототипа. (Из всех результатов экспедиции на Марс самым долгожданным будет, пожалуй, сообщение о типе молекулярной симметрии живых существ, если таковые там имеются. Если симметрия их противоположна нашей, следовательно, происхождение жизни на Марсе и происхождение жизни на Земле совершенно независимы. Если типы симметрии окажутся одинаковыми, это можно объяснить или



Ф и г. 16. Молекулярная асимметрия.

Молочная кислота $\text{CH}_3-\underset{\text{OH}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$ — одно из простейших

веществ, обладающее асимметрическим углеродным атомом и обнаруживающее оптическую изомерию. Две молекулы, как две руки, подобны, но их нельзя совместить друг с другом.

случайным совпадением, или тем, что жизнь на обеих планетах имеет единое происхождение.)

Вся земная жизнь принадлежит одной из двух возможных форм, отличающихся только типом молекулярной симметрии. Белки и углеводы, из которых построен наш организм и которые входят в состав нашей пищи, могли бы существовать в форме своего зеркального отображения, сохранив при этом, казалось бы, все свойства, но они были бы тогда совершенно бесполезными и неусвояемыми для земных организмов. Химики получили смеси, состоящие из равных частей правых и левых изомерных форм питательных веществ, и проводили опыты по скармливанию этих смесей живым существам, чаще всего микроорганизмам, например дрожжам. При этом было обнаружено, что микроорганизмы включают в свой обмен ту форму, которая является «природной» (здесь на Земле), тогда как второй изомер остается неиспользованным. Реакции, происходящие в живых организмах, управляются и регулируются ферментами — очень сложными органическими веществами, обладающими свойствами катализаторов. Эти ферменты сами по себе асимметричны, и свою асимметрию они передают как реакциям, которыми управляют, так и продуктам, которые получают при этих реакциях.

Итак, ферменты стереоспецифичны. Но какое отношение имеет все это к запахам и обонянию?

Прежде всего возникает вопрос: одинаковые ли запахи имеют вещества, являющиеся оптическими изомерами и, следовательно, отличающиеся друг от друга только симметрией?

При современном уровне знаний на этот вопрос лучше всего ответить так: «Запахи оптических изомеров довольно похожи».

Существует несколько пар оптических изомеров, у которых и пороговые концентрации и запахи неразличимы. Существует несколько пар изомеров, запахи которых одно время считались разными, но, после того как эти вещества удалось тщательно очистить, их запахи стали неразличимыми. Наконец, существуют и такие пары изомеров, которые пахнут не совсем одинаково, несмотря на самую тщательную очистку, хотя запахи их различаются скорее по «оттенку», чем по «характеру». Вполне возможно, что эти различия действительно существуют, но они могут объясняться и присутствием ничтожных примесей.

Предположим, например, что пороговая концентрация какого-то вещества составляет 1 на 10^6 частей воздуха. Если это вещество содержит 0,01% примеси, а пороговая концентрация примеси равна 1 на 10^{12} частей воздуха, то при достаточно низкой концентрации всей смеси запах примеси будет более ощутимым, чем запах основного вещества, несмотря на то что смесь содержит 99,99% основного вещества, а лишь немногие реактивы настолько чисты.

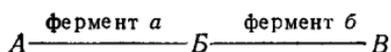
По крайней мере одному из известных случаев различий между свойствами изомеров можно дать другое объяснение. Дол и Бурно, очень тщательно очистив правую и левую формы ментола, обнаружили, что оба изомера вызывают одинаковую физиологическую реакцию и имеют одинаковый запах вплоть до концентрации их во вдыхаемом воздухе, равной двадцати пороговым. И только при дальнейшем повышении концентрации начинают проявляться различия в ощущении этих изомеров. Дело в том, что ментол не просто пахучее вещество, он обладает еще способностью действовать на температурные рецепторы. Согласно Хензелю и Зоттерману, действие ментола на терморекцепторы связано, по-видимому, с участием каких-то ферментов. Поэтому сложное ощущение запаха и холода для двух изомерных форм ментола должно быть разным.

Итак, оптические изомеры, если они достаточно хорошо очищены, имеют одинаковые или почти одинаковые запахи. Случай, когда один из изомеров имеет запах, а другой никак не пахнет, до сих пор не известны. Поэтому есть все основания считать, что если один из изомеров как-то пахнет, то пахнет и другой, причем запахи их очень сходны, если не идентичны. На основании всего этого можно сделать очень важный вывод.

Несколько раньше говорилось о том, что ферменты во всех химических реакциях в высшей степени стереоспецифичны. Если фермент может участвовать в химическом превращении правой формы вещества, то при этом не затрагивается левая форма данной пары изомеров, и наоборот. Тот факт, что практически у любого вещества оба оптических изомера имеют запах, причем очень сходный, указывает (и, как мне кажется, убедительно) на то, что химическая реакция не является основой процесса восприятия запаха. Молекулы пахучего вещества в процессе взаимодействия с мембраной обонятельной клетки

ничего не окисляют и не восстанавливают, и сами они при этом не окисляются и вообще никак химически не изменяются, вызывая ощущение запаха. Действительно, для протекания любой химической реакции почти наверняка требовалось бы участие ферментов, а поскольку ферменты стереоспецифичны, то правая и левая формы пахучего вещества вели бы себя при этом различно.

Возможен другой способ взаимодействия фермента и молекулы пахучего вещества, который был использован для объяснения феномена запаха и особенно того факта, что многие вещества характеризуются очень низкими пороговыми концентрациями. Эта теория была выдвинута Г. Б. Кистяковским, который предполагает, что в мембранах обонятельных клеток может иметь место такая последовательность реакций:



В обычных условиях вещество B присутствует в очень маленьком количестве, потому что оно распадается с такой же скоростью, с какой и образуется. Если бы пахучее вещество каким-то образом взаимодействовало с ферментом b , концентрация вещества B могла бы сильно возрасти и количество образовавшегося вещества B могло бы значительно превысить количество пахучего вещества, необходимое для выведения фермента b из строя (его блокирования). (Объем воды, выливающейся из крана в ванну, никак не связан с размером пробки, которой затыкают сток!) Кистяковский предполагает, что таким образом ферменты могут «усиливать» слабый сигнал от небольшого количества пахучего вещества, для того чтобы появилось сильное ощущение. Он полагает также, что высокую информационную емкость обонятельной системы можно объяснить существованием достаточно большого количества ферментных систем такого рода, каждая из которых чувствительна к определенному первичному запаху.

К сожалению, эта заманчивая идея непоправимо разбивается об упрямый факт существования запаха у обоих членов пары оптических изомеров, которые к тому же имеют очень близкие запахи. Последнее уж совершенно несовместимо с очень высокой стереоспецифичностью ферментов.

Трудно предполагать, что пахучие вещества каким-1 образом обходят стереоспецифичность и оказывают одно и то же действие на некоторый данный фермент. Однако такие вещества хорошо известны. Им, например, является цианистоводородная, или синильная, кислота HCN . Это вещество — смертельно опасный яд, и именно потому, что оно действует неспецифично на все ферменты. Синильная кислота ядовита, так как повергает в хаос все химические процессы, происходящие в нашем организме, неспецифично блокируя все виды ферментативных реакций.

Итак, ситуация ясна. Пахучие вещества обычно не являются опасными ядами, а их право- и левосторонние формы имеют близкие запахи. Поэтому нельзя считать обоняние в основе своей химическим явлением. А значит, совсем не случайно Дайсону и другим экспериментаторам не удалось обнаружить зависимости запаха от химического строения или реакционной способности пахнущих веществ.

Роль формы молекул

Чем же определяются запахи разных веществ, если они не зависят от химических свойств?

В науке принято подразделять свойства разных веществ на физические и химические. Если мы определяем свойства вещества по способу его обнаружения нашими органами чувств, разница между химическими и физическими свойствами будет выглядеть примерно следующим образом: проявление химических свойств сопровождается изменением химического состава или строения, тогда как при выявлении физических свойств вряд ли можно предполагать какие-либо изменения в строении молекул вещества. Возьмем крайний случай: при взрыве динамита изменения носят химический характер, а если взрывается паровой котел, происходят уже чисто физические изменения. Но очень часто бывает трудно установить характер изменений, потому что они происходят на молекулярном уровне и слишком тонки, чтобы определить их имеющимися у нас методами. Это очень беспокоит тех людей, которые любят пунктуально все классифицировать и укладывать в схемы, полагая, что природа будет следовать таким схемам. Они забывают, что, прежде чем описывать природу, ее нужно наблюдать. Между тем изменения могут быть одновременно и физическими и химическими или ни теми и ни другими, а какими-нибудь еще, например обусловленными радиоактивным распадом. Однако это уже тонкости, и мы будем иметь в виду такие физические свойства, как магнитные и электрические, способность поглощать свет и т. п.

Время от времени в научной литературе появлялись (и появляются до сих пор) сообщения о возможной связи запаха с физическими свойствами веществ, но до сих пор практических успехов в этой области не было. Монкриф в своей книге, посвященной природе вкусовых и обонятельных ощущений, привел подробный обзор такого рода данных, опубликованных до 1950 г., а Ф. Джонс и М. Джонс в статье, которая появилась почти одновременно с книгой Монкрифа, критически оценили теории,

касающиеся связи запаха с физическими свойствами. Все эти ученые пришли к выводу, что если нет доказательств химической природы запаха, то и удовлетворительного физического объяснения этого явления тоже не находится. В настоящей главе мы попытаемся рассказать о тех небольших успехах, которые были достигнуты с 1950 года.

Сначала, однако, я должен сказать несколько слов о теории, имевшей некоторый успех после 1947 г. В одной из общеизвестных энциклопедий, изданной в 1962 г., эта теория еще названа современной, хотя в настоящее время от нее окончательно отказались.

В 1947 г. Бек и Майлс предположили, что молекулы различных пахучих веществ могут в той или иной степени поглощать инфракрасное излучение с определенными длинами волн, и, если обонятельные клетки излучают волны этой же длины, они будут избирательно охлаждаться, находясь вблизи молекул, поглощающих такое излучение. Это охлаждение регистрируется в мозгу как ощущение запаха. Подтверждая эту теорию, ее авторы описали эксперименты с медоносными пчелами, когда насекомые находили мед, спрятанный в герметически закрытых сосудах с окошками, пропускающими инфракрасные лучи.

Как сама теория, так и эксперименты сразу были поставлены под сомнение. Из теории следовало, что нервные клетки обонятельных органов должны быть теплее или холоднее, чем окружающий воздух, потому что, если воздух и клетки имеют одинаковую температуру, никакое изменение состава воздуха не сможет изменить температуру клеток. Поэтому, согласно их теории, ощущение запаха должно исчезать, когда температуры носа и воздуха выравниваются; но ничего подобного не наблюдается на практике. Есть и другие возражения против теории Бека и Майлса. Даже если предположить, что возникает перепад температур и молекулы пахучего вещества избирательно охлаждают поверхность клеток, «сигнал» от их специфического действия был бы (при малых концентрациях вещества) неотличим от неспецифического охлаждения, вызванного, например, присутствием многочисленных молекул азота и кислорода воздуха. Следовательно, на основании этой теории нельзя было бы объяснить очень низкие значения пороговых концентраций, которыми

характеризуются многие вещества. В довершение всего опыты с насекомыми, которые повторил Джонстон с некоторыми дополнительными предосторожностями, дали отрицательные результаты. По всем этим причинам теория Бека и Майлса не получила признания.

Мулинс рассмотрел иную возможность: он предположил, что действие пахучих веществ на обонятельные клетки напоминает действие наркотиков и анестезирующих веществ на нервы, однако теория, развитая на основании этого предположения, тоже оказалась не слишком убедительной.

В настоящее время в интересующей нас области существуют две теории, правда не особенно новые, а просто по-новому оформленные.

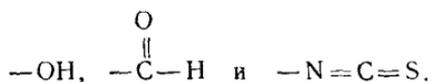
Первая пытается связать пахучие свойства молекул с их формой, а значит, со способностью молекул заполнять определенные участки, или гнезда, на поверхности обонятельных клеток, так что эта теория может быть названа теорией «заполнения гнезд». Мы уже отчасти касались ее в главе XIII, когда рассматривали работу Дэвиса и Тэйлора.

Чтобы рассчитать пороговую концентрацию, эти авторы предполагали, что способность молекулы «пробивать» мембрану обонятельной клетки зависит от комбинации двух свойств — сродства к мембране и эффективности молекул. Первое определяет концентрацию молекул пахучего вещества в поверхностном слое, второе связано с формой поперечного сечения данной молекулы. Оба эти свойства, вообще говоря, зависят от формы, химического состава и строения молекулы. Битс с целью объяснения многообразия запахов пытался развить дальше представления Дэвиса и Тэйлора, но даже сам не следовал им при количественном расчете пороговых концентраций.

Чтобы объяснить существование множества разнообразных запахов, Битс предложил концепцию, названную им теорией «форма молекулы — функциональная группа».

Битс исходил из того, что форма молекулы, или, точнее, форма той ее части, которая обращена к мембране обонятельной клетки, зависит от расположения функциональной группы, связывающей молекулу с мембраной. Функциональная группа определяет также и сродство. Ею называют ту часть молекулы, которая обычно не может

существовать самостоятельно, но присутствие ее придает данной молекуле определенные свойства. Примерами функциональных групп могут служить спиртовая (гидроксильная), альдегидная и изотиоцианатная:



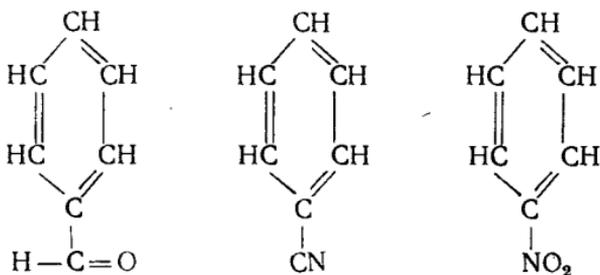
Согласно теории Битса, физиологическая активность вещества зависит и от сродства молекул к мембране и от эффективности молекул, что в свою очередь связано как с химическими свойствами (которые определяются природой функциональных групп), так и с формой молекулы или с формой ее поперечного сечения.

Например, в фенилгорчичных маслах, которые изучал Дайсон, функциональной группой, предположительно связывающей молекулу с мембраной обонятельной клетки, является изотиоцианатная группа $-\text{N}=\text{C}=\text{S}$, а положение в фенильном цикле второго заместителя влияет на форму молекулы и, следовательно, на вид гнезда или лунки, куда молекула может «улучься». Это объясняет, почему на характер запаха обычно больше влияет именно положение второго заместителя, а не его природа. Если в молекуле присутствуют две (или более) функциональные группы, способные связывать молекулу с мембраной поразному или в разных местах, может случиться, что одни молекулы ложатся на мембрану так, а другие иначе, что в конечном итоге вызовет ощущение сложного запаха.

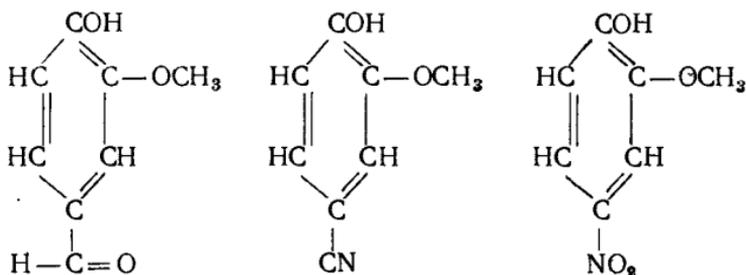
Основное допущение — форма молекулы определяет вид лунки, а имеющаяся в веществе функциональная группа определяет «сродство» молекулы с этой лункой — является достаточной гарантией того, что молекулы каждого вида укладываются в соответствующие им лунки и, таким образом, выбор лунки определяется как функциональной группой, так и формой молекулы. В подробно рассмотренной ранее группе фенилгорчичных масел положение большинства заместителей у четвертого атома углерода по отношению к изотиоцианатной группе придает веществам запах аниса. В том случае, однако, если заместитель в четвертом положении представляет собой альдегидную группу, запах вещества совершенно меняется: оно пахнет гелиотропом. Возможно, что в этом случае альдегидная группа в качестве функциональной доминирует

рует над изотиоцианатной и направляет большинство молекул в другие гнезда. В рассмотренном примере главную роль, очевидно, играет функциональная группа.

Битс предполагает, что может быть справедливо и обратное; например, три вещества, формулы которых приведены ниже, одинаково пахнут горьким миндалем, потому что они подходят к лункам одного вида:



Если изменяется форма молекул, они уже не укладываются в тот же вид лунок и запах у следующих трех веществ меняется на ванильный:



Здесь уже в определении характера запаха форма молекулы преобладает над функциональной группой.

Таким образом, представления о совместном влиянии на запах двух факторов — формы молекул и природы имеющихся в них функциональных групп, а также взаимоотношений между этими факторами — дают возможность довольно легко объяснить многие непонятные явления. Теория Битса довольно проста, но, к сожалению, объясняет лишь уже известное нам о запахе и почти ничего не дает для предсказания того, чего мы еще не знаем: какой

запах будет иметь новое вещество. Это, однако, не означает, что теория Битса неверна, но ясно, что она мало полезна.

Как это часто бывает в науке, одна и та же идея разрабатывалась разными учеными независимо друг от друга. (Теории «заполнения гнезд», или «ключа и замка», не новы; Троланд, например, выдвигал подобную идею еще в 1930 году.) В 1952 году Эймур предложил теорию, очень напоминающую теорию Битса, за тем исключением, что в ней придавалось гораздо большее значение геометрической форме молекулы, чем имеющимся в ней функциональным группам. С тех пор его теория получила значительное развитие; в известном смысле она начинается там, где кончается теория Битса.

Эймур исходил из предположения, высказанного еще Монкрифом, что запах вещества зависит от формы его молекул, от того, насколько точно они «вписываются» в соответствующую лунку, или гнездо, на поверхности рецептора. Если это так, то все вещества, имеющие сходные запахи, должны иметь похожие формы, или, точнее, похожие по форме части молекулы. Вещество, форма молекул которого соответствует только одному виду лунок, будет иметь первичный запах, а так как число четко различимых по форме лунок, естественно, ограничено, первичных запахов должно быть сравнительно немного.

Вероятно, найдется некоторое число таких веществ, молекулы которых смогут подойти более чем к одному типу лунок, или гнезд. Однако с точки зрения теории вероятностей их будет очень немного. Если мы возьмем произвольный набор разных молекул, может оказаться, что только одна из десятка сможет подойти по форме к лунке любого типа. Но из элементарной задачи теории вероятностей следует, что если вероятность того, что произойдет событие А, равна $\frac{1}{10}$, а вероятность того, что произойдет событие В, тоже $\frac{1}{10}$, то вероятность того, что события А и В произойдут одновременно, будет равна $\frac{1}{100}$.

Эймур взял это положение за основу для разработки остроумного метода нахождения первичных запахов, необходимого для его теории.

Если молекулы, форма которых соответствует лункам только одного какого-то типа, встречаются чаще, чем молекулы, подходящие по форме к двум или трем разным

лункам, то можно предполагать, что веществ с простыми первичными запахами должно быть гораздо больше, чем веществ, имеющих сложные запахи. (Это рассуждение применимо только к чистым веществам; при переходе к смесям возможности значительно увеличатся.) Эймур просмотрел химическую литературу, выбирая из нее описания запахов органических веществ, и составил на основании этих данных следующий список:

<i>Запах</i>	<i>Число веществ, имеющих этот запах</i>
Камфарный	106
Острый	95
Эфирный	53
Цветочный	71
Мятный	77
Мускусный	69
Гнилостный	49
Миндальный	30
Ароматный	27
Анисовый	12
Лимонный	7
Хвойный	7
Чесночный	7
Прогорклый	6
<hr/> Итого	<hr/> 616

Принимая во внимание частоту, с какой встречается тот или иной запах, и жесткость молекулярной структуры, Эймур пришел к выводу, что первые семь запахов в этом списке являются, вероятно, первичными, а последние четыре — сложными. Что касается «миндального», «ароматного» и «анисового», то эти три «сомнительных» запаха, по-видимому, могли быть как простыми, так и сложными.

Теперь нужно было посмотреть, что известно относительно формы молекул, соответствующих каждому из этих предположительно первичных запахов. Если бы действительно оказалось, что молекулы всех веществ с одинаковым «первичным» запахом похожи по форме, то можно было бы сделать выводы о вероятной форме рецепторных

лунок, или гнезд, на мембране обонятельной клетки. В результате применения молекулярных моделей подтвердилось, что первые семь запахов приведенного списка можно считать первичными, а остальные, включая три сомнительных, — сложными.

Были рассчитаны приблизительные размеры этих лунок, соответствующих семи первичным запахам. По предварительным данным, «эфирная» лунка имеет вытянутую форму (фиг. 17); ширина ее 5 ангстрем, глубина — 4 ангстрема и длина 18 ангстрем (1 ангстрем (Å) равен 10^{-8}см). Возможно, для возникновения ощущения эфирного запаха необходимо, чтобы в этой лунке находилось одновременно более одной молекулы.

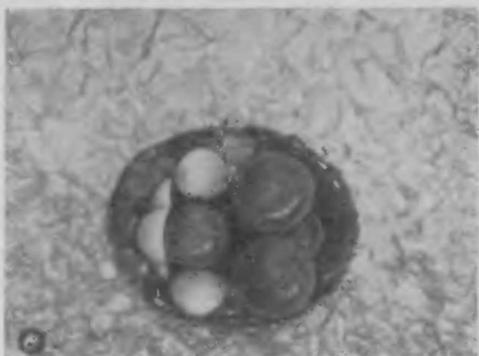
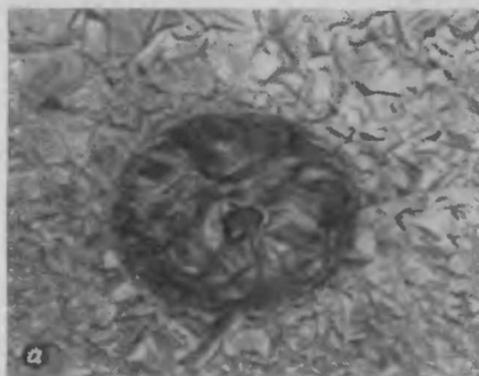
«Камфарная» лунка представляется в виде эллиптической чаши глубиной 4 Å , длиной 9 Å и шириной 7,5 Å (фиг. 18). Аналогичную форму имеет рецепторная лунка «мускусного» запаха, только она несколько больше: 9 Å в ширину и 11,5 Å в длину. Рецепторная лунка «цветочного» запаха, как предполагается, имеет более сложную форму (фиг. 19). Она состоит из округлого углубления диаметром 9 Å и более глубокого отвода шириной 4 Å , начинающегося в середине и отходящего от края круглой части на 7,5 Å . Остальные рецепторные лунки имеют более простую форму, но у них, согласно предположению Эймур, должны быть какие-то определенные строго локализованные участки, характеризующиеся повышенным химическим сродством, за счет которого с мембраной могут связываться определенные функциональные группы молекул пахнущих веществ. Таким образом, Эймур и Битс независимо пришли к одному и тому же заключению: взаимодействие молекул пахнущего вещества с мембраной обонятельной клетки зависит одновременно от формы молекулы и от наличия в ней функциональных групп.

Ни одна из этих теорий ничего не говорит ни о возникновении нервного импульса при попадании молекул в соответствующие им лунки, ни о том, каким образом молекулы покидают лунки, чтобы освободить место для новых.

Решающей проверкой любой научной теории является ее способность достоверно предсказывать. Теория Эймур единственная из всех теорий заполнения гнезд выдержала это испытание. Рубин, Апотекер и Лутмер, например,



Ф и г. 17. Стереохимическая теория обоняния: *а* — вид «эфирного» гнезда, по представлениям Эймура; *б* — молекула диэтилового эфира в «эфирном» гнезде; *в* — две молекулы метилацетата в «эфирном» гнезде.



Ф и г. 18. Стереохимическая теория обоняния: *a* — вид «камфарного» гнезда, по представлениям Эймура; *б* — молекула циклооктана в «камфарном» гнезде; *в* — молекула хлорэтана в «камфарном» гнезде.



Ф и г. 19. Стереохимическая теория обоняния: *а* — вид гнезда, соответствующего, по представлениям Эймура, «цветочному» запаху; *б* — молекула гераниола в гнезде «цветочного» запаха; *в* — молекула розетона в гнезде «цветочного» запаха.

Работая с шестью опытными дегустаторами, Джонстон предлагал им разнообразные духи с запахом мускуса, изготовленные из разных исходных веществ, причем оценка запаха производилась в строго контролируемых условиях температуры, влажности и концентрации пахучего вещества, а чистоту исходных веществ Джонстон проверял с помощью недавно разработанного чрезвычайно чувствительного метода газовой хроматографии. Результаты этих опытов показали, что все шесть «судей» не могли с полной уверенностью различать по запаху мускусы, принадлежащие к трем разным классам химических соединений.

На основании этих результатов Джонстон сделал вывод, что ощущение мускусного запаха обусловлено раздражением рецептора какого-то одного типа, а поэтому, вероятно, запах мускуса является первичным. Это вполне согласуется с теорией Эймура, однако не доказывает ее правильности. Представление о первичном запахе предполагает наличие одного определенного механизма ощущения этого запаха, но совсем не обязательно связано с заполнением лунки. Перед рассмотрением других возможных вариантов необходимо несколько подробнее остановиться на экспериментах Джонстона с мускусами и на самой общей теории Эймура.

Джонстон в только что описанном опыте показал, что шесть дегустаторов обычно путали мускусные запахи, обусловленные тремя химическими веществами разных классов, однако другой исследователь, Гилло, получил иные результаты. Он работал с десятью людьми, подобранными совершенно произвольно, и обнаружил у них несколько различных типов частичной аносмии. Одна женщина, например, не чувствовала фиалкового запаха метилионона, хотя воспринимала его «древесную» компоненту, а несколько других людей не чувствовали запаха горького миндаля у синильной кислоты. Результаты экспериментов Гилло с мускусами особенно интересны в свете теории Эймура. Он нашел одного человека, который, не чувствуя мускусного запаха стерина, прекрасно ощущал запахи других мускусов. Несколько человек не чувствовали запаха макроциклических мускусов, тогда как запахи других мускусов воспринимали нормально, а один испытуемый не ощущал запаха ни стероидных, ни макроциклических мускусов, но чувствовал запах нитро-

мускусов. Эти результаты были проверены и подтверждены опытами Ле Магнена.

На основании этих опытов Гилло заключил, что должны существовать несколько разных типов чувствительных участков, способных регистрировать мускусоподобный запах, и у некоторых людей может недоставать того или иного типа участков. Его вывод полностью противоположен результатам Джонстона, а объяснить это противоречие можно, вероятно, тем, что Джонстона подвела его собственная тщательность! Действительно, его шесть подопытных были отобраны из первоначальной группы в 37 человек, причем их отбирали по принципу безусловной надежности в восприятии запахов широкого круга веществ, в том числе и веществ с мускусным запахом. Критерии Джонстона в оценке квалифицированного дегустатора автоматически исключали людей с частичными anosмиями, а Гилло, наоборот, искал именно таких людей — и нашел их.

Четкие эксперименты обоих ученых дали очень интересные ответы, но на разные вопросы.

Джонстон полагал, что его эксперименты доказывают первичность мускусного запаха, потому что люди с всесторонне развитым обонянием путают мускусные запахи веществ различных классов. А Гилло и Ле Магнен показали, что люди, лишенные этой всесторонней способности, могут различать мускусные запахи разных веществ. Нечто подобное наблюдается у людей с частичной цветовой слепотой: они могут различать цвета предметов, которые людям с нормальным зрением кажутся одинаковыми. Результаты, полученные Гилло, нельзя приписать недостаточной чистоте использованных им веществ, потому что участники его опытов ощущали не степень качественного различия запахов, а либо отчетливо чувствовали запах вещества, либо вовсе не чувствовали его.

Следует, разумеется, гораздо подробнее изучить распространенность этих частичных anosмий и характерные особенности этого явления, прежде чем делать скольконибудь основательные выводы, но при настоящем положении вещей эксперименты Гилло свидетельствуют, что мускусный запах не является первичным, по крайней мере в том смысле, как это понимает Эймур.

Я думаю, что существование частичных anosмий и различий в восприятии запахов у людей в общем можно счи-

тать установленным, и поэтому интересно посмотреть, встречаются ли такие явления у животных.

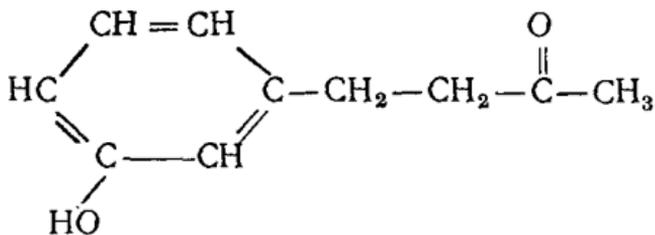
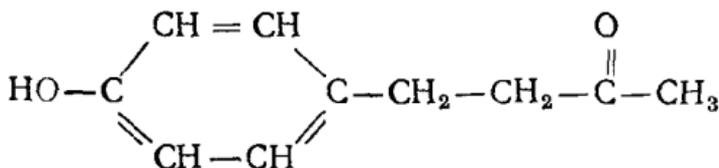
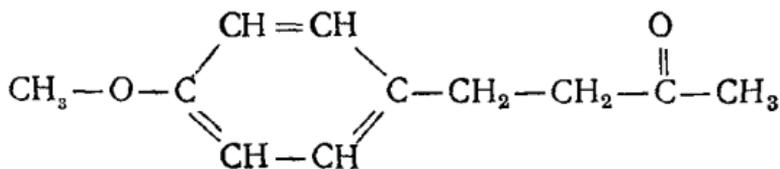
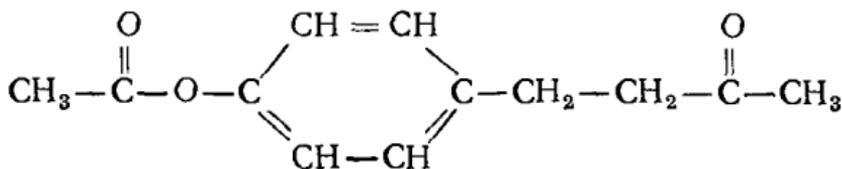
В главе VI были описаны различные вещества, привлекающие дынных мух. Типичное вещество этого рода — пара-метоксибензилацетон. Было синтезировано много вариантов этого соединения и все полученные вещества двумя различными методами испытывали на способность привлекать дынных мух. Первый метод, так называемая олфактометрическая проба, заключался в том, что мухам предоставлялся выбор между чистой водой и водными растворами или эмульсиями трех разных веществ. Численную характеристику привлекающей способности данного вещества получали путем деления количества мух, собранных раствором, содержащим испытуемое вещество, на количество мух, прилетевших на чистую воду. Во втором методе — фитильковой пробе — использовали ватный тампон, пропитанный испытуемым веществом, который выставляли на несколько дней на воздух. Активность вещества измеряли, сравнивая число мух, налетавших на тампон в течение 15-минутного периода, с числом мух, привлекаемых в тех же условиях стандартной высокоэффективной приманкой. Эти два метода испытаний не всегда давали достаточно воспроизводимые результаты и в количественном отношении оставляли желать лучшего. Они, однако, вполне отчетливо показывали, реагируют ли мухи на данные вещества или не обращают на них никакого внимания.¶

Недавно Винтером было опубликовано сообщение о запахах нескольких из этих соединений (характеристики запахам этих веществ давали шесть опытных химиков-парфюмеров). Ниже приведены характеристики запахов девяти соединений и данные о способности этих веществ привлекать дынных мух.

Как видно из приведенных данных, способность вещества привлекать насекомых не связана с восприятием запаха этого вещества человеком. Если теория Эймюра верна, то этот вывод мог бы означать, что рецепторы насекомых имеют какой-то тип лунок, которых нет у человека. Это вполне возможно, но такое предположение весьма опасно, потому что теория заполнения гнезд теряет свой смысл и ценность, если придется допустить существование слишком большого числа лунок.

Явление частичной аносмии у людей и животных

Формула вещества



Характеристика запаха (человек)	Способность привлекать дынных мух	
	олфактометрическая проба	фитильковая проба
слабый малиновый	34	88
слабый малиновый	33	100 (стандарт)
слабый малиновый	20	400
не фруктовый и не малиновый	32	13

не фруктовый и
не малиновый

1

0

не фруктовый и
не малиновый

21

50

не фруктовый и
не малиновый

31

не испытывал-
ся

не фруктовый и
не малиновый

20

0

не фруктовый и
не малиновый

20

0

представляет собой серьезное и далеко не единственное возражение против теории Эймура. Я полагаю, что, имея в своем распоряжении лишь семь первичных запахов (причем один из них, «острый», возможно, не является запахом, а представляет собой «болеую реакцию», которая ощущается и поступает в мозг через самостоятельную систему нервных волокон), невозможно объяснить очень высокую информационную емкость обонятельного аппарата. Другими словами, из семи первичных запахов трудно скомбинировать устройство, по эффективности равное носу. Поэтому на основании причин, которые уже обсуждались в главе XI, я считаю более вероятным, что число первичных запахов у человека равно примерно 25—30. Теория Эймура могла бы быть соответственно расширена, но при этом она утратила бы свою простоту, а вместе с ней и привлекательность.

Квантовая теория запаха

«Молекулу пахучего вещества, такого, например, как бензальдегид, можно нарисовать себе как собрание или группу атомов, расположенных в пространстве в соответствии с представлениями химика-органика. Однако эти атомы не неподвижны: они колеблются около некоторого среднего положения, они динамичны — в том смысле, что периодически меняют свое положение относительно соседних атомов. Не все такие движения воспринимаются обонятельными органами, но некоторые из них, доступные восприятию, составляют осмические¹ частоты молекулы, и именно они, воздействуя на чувствительные мембраны носа, создают ощущение запаха».

Эта четкая формулировка вибрационной гипотезы обоняния была приведена в статье, опубликованной Дайсоном в 1937 г. Автор пришел к этому обобщению в результате работы с горчичными маслами, проведенной им несколькими годами раньше. В те годы уже знали о молекулярных колебаниях, но техника эксперимента еще не позволяла ни регистрировать, ни измерять их. Ситуация изменилась в 1937 г., когда впервые появилась возможность описывать внутренние колебательные движения молекул; а вскоре был разработан еще один метод. Эти два пути исследования молекулярных колебаний известны под названиями эффекта комбинационного рассеяния света (Раман-эффекта)² и метода инфракрасной спектроскопии.

Чтобы понять хотя бы в общих чертах эти методы, необходимо обратиться к принципам, лежащим в их основе.

Электрический заряд или электрически заряженный предмет притягивает или отталкивает другой заряд или другой заряженный предмет с силой, которая зависит от величины зарядов и расстояния между ними. До тех пор

¹ От греч. «osme» — запах.— Прим. перев.

² Явление комбинационного рассеяния света было открыто в 1928 г. одновременно Г. С. Ландсбергом и Л. И. Мандельштамом в СССР и Раманом и Кришнаном в Индии. В литературе, особенно зарубежной, носит название Раман-эффекта.— Прим. перев.

пока величины зарядов остаются постоянными, а положения их — фиксированными, между ними действует постоянная сила; однако в случае перемещения одного заряда эта сила меняется; если один из зарядов совершает поперечные колебательные движения относительно линии, соединяющей заряды, сила его взаимодействия с другим зарядом флуктуирует. (Для простоты мы не будем рассматривать здесь возвратно-поступательные движения вдоль линии, соединяющей заряды.) Флуктуации силы на втором заряде не совпадают в точности с периодичностью движения первого заряда, потому что для передачи в пространстве изменений во взаимодействии двух зарядов требуется некоторое время. Электрическое возмущение движется в пространстве со скоростью света, и если частота колебаний первого заряда достаточно велика, то возмущение, посылаемое им в пространство, представляет собой свет. «Световые волны», о которых говорят физики, — это периодические флуктуации электростатических сил, возникающие при колебаниях электрических зарядов.

Помимо электрических, существуют магнитные силы. Движение электрического заряда — это не что иное, как электрический ток. А если поднести магнитную стрелку компаса к проводу, по которому проходит электрический ток, легко увидеть, что движение электрических зарядов создает магнитные силы. Если заряд движется попеременно взад и вперед, то каждый раз с изменением направления тока меняется направление магнитных сил, причем эти изменения силы магнитного поля не передаются через пространство мгновенно, а распространяются с некоторой конечной скоростью, равной скорости света в данной среде, как и в случае электрических колебаний.

Таким образом, неподвижный электрический заряд окружен электростатическим полем и не имеет магнитного. Осциллирующий, то есть колеблющийся, заряд генерирует в окружающей среде электрические и магнитные волны. Эти волны распространяются в пространстве с чрезвычайно высокой скоростью — той же самой скоростью света, — составляющей примерно 3×10^{10} см/сек; ее обычно обозначают буквой *c*. Так как при колебании электрического заряда возникают и электрические и магнитные силы, такое явление называют электромагнитным излучением. Если пульсация происходит сравнительно

медленно (то есть с низкой частотой), такое излучение принято называть радиочастотным; оно охватывает весь диапазон от длинноволновых широкоэмиттерных полос до ультравысоких частот, используемых в радиолокаторах и коротковолновой телевизионной связи. При дальнейшем увеличении частоты колебаний мы получаем инфракрасные, или тепловые, лучи, далее — видимый свет, а затем — ультрафиолетовое и рентгеновское излучения.

Если излучение распространяется в среде со скоростью c сантиметров в секунду, а частота колебаний источника радиации равна ν раз в секунду, тогда в течение одной секунды будет послано ν волн, которые пройдут за секунду расстояние, равное c сантиметрам, а длина каждой волны λ составит c/ν . Таким образом, три величины — длина волны λ , скорость распространения волн c и частота ν — связаны между собой следующим соотношением:

$$c = \nu\lambda.$$

На практике измерять длину волны легче, чем частоту, и поэтому частоту чаще всего вычисляют по формуле

$$\nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Однако в это выражение входит скорость света c , значение которой известно лишь приближенно. Поэтому если длины волн с помощью этой формулы превращены в значения частоты, то последние пришлось бы пересчитывать всякий раз по уточнению величины скорости света. Во избежание этого обычно вычисляют не c/λ — истинную частоту, или число колебаний в секунду, а $1/\lambda$, которую также называют частотой, хотя в действительности эта величина соответствует числу волн в одном сантиметре и правильное ее название — волновое число. Для того чтобы от значения волнового числа перейти к частоте, нужно умножить его на скорость света c .

В начале нашего столетия стало известно, что атомы построены из положительно и отрицательно заряженных частиц. В результате колебательных движений молекул и атомов, а также составных частей атомов возникают электромагнитные волны, а также разнообразные взаимодействия излучения с веществом. Именно такого рода взаимодействия обуславливают как Раман-эффект (эффект

комбинационного рассеяния света), так и поглощение веществом инфракрасных лучей.

При измерениях поглощения используют способность исследуемого вещества поглощать волны определенной длины, частота которых соответствует частоте молекулярных колебаний испытуемого образца. Прошедшее через образец непоглощенное излучение с помощью призмы раскладывается далее в спектр, на котором видны темные полосы, соответствующие поглощенному образцом излучению. Частота недостающего излучения в этих так называемых полосах поглощения непосредственно соответствует колебательным частотам молекул, поглотивших данное излучение. Таким образом, определить вибрационные частоты молекул в принципе довольно легко, однако необходимые для таких исследований приборы сложны и дороги. Так, например, спектрометр, работающий в близкой инфракрасной области, стоит от 5 до 20 тысяч долларов, а приборов для работы в далекой инфракрасной области (которая, как мы увидим дальше, особенно интересна в связи с изучением природы запаха) до недавнего времени в продаже вообще не было, экспериментаторы должны были конструировать и изготавливать их сами. Начиная с 1961 г. в продажу поступило лишь несколько экземпляров спектрометров, работающих в далекой инфракрасной области, причем модель 1963 г. стоит около 35 тысяч долларов. Это весьма печально и в то же время очень важно, так как объясняет, почему иногда современный исследователь в погоне за финансовой помощью вынужден усмирять свои стремления к знаниям. Таких областей науки, где исследования можно вести в деревянном сарае с прибором, сделанным из сургуча и веревки, осталось очень мало.

Если не считать трудностей приобретения оборудования и его высокой стоимости, метод определения инфракрасных спектров поглощения довольно прост.

Другой метод исследования молекулярных колебаний основан на Раман-эффекте. Он несколько сложнее для понимания, потому что непосредственно связан с квантовой теорией.

В 1900 г. Макс Планк установил, что энергия частиц или электрических зарядов атомных или молекулярных размеров, колеблющихся около какого-то среднего положения, изменяется не непрерывно, а некоторыми строго

определенными дискретными порциями, или квантами. Осциллятор может иметь энергию, равную одному кванту, двум, трем или любому другому целому, но не дробному числу квантов. Величина кванта, то есть количество единиц энергии осциллятора, зависит от характеристической частоты ν (которая в свою очередь зависит от участвующих в колебательном процессе масс и сил) и описывается формулой

$$E = nh\nu,$$

где E — энергия осциллятора, ν — частота осциллятора, то есть количество колебаний в секунду, h — универсальная постоянная, известная под названием постоянной Планка; коэффициент n в этой формуле равен 0, 1, 2 или вообще любому целому числу квантов, соответствующему энергии осциллятора.

Если вы спросите, почему это так, физики не дадут вам иного ответа, кроме «таковы законы природы».

Использование Раман-эффекта в качестве способа изучения спектров молекулярных колебаний основано на том, что эти колебания подчиняются правилам квантования, так как представляют собой колебания в структурах молекулярных размеров. Если сквозь прозрачное вещество проходит электромагнитное излучение какой-нибудь одной определенной частоты (так называемый монохроматический свет), то некоторые молекулы вещества, поглощая энергию излучения, будут совершать вынужденные колебания. Если частота падающего излучения ν_i , то энергия его равна $h\nu_i$. Когда молекулярные осцилляторы поглощают часть энергии падающего излучения, его энергия, а следовательно, и частота уменьшаются до некоторого нового значения ν_0 , так что поглощенная веществом энергия $= h\nu_i - h\nu_0$. Но эта энергия была отнята у первичного пучка молекулами, вынужденными колебаться с какой-то собственной частотой ν , и, следовательно, энергия, потерянная излучением, должна быть равна энергии, поглощенной молекулами, то есть

$$\begin{aligned} \text{или} \quad h\nu &= h\nu_i - h\nu_0 \\ \nu &= \nu_i - \nu_0. \end{aligned}$$

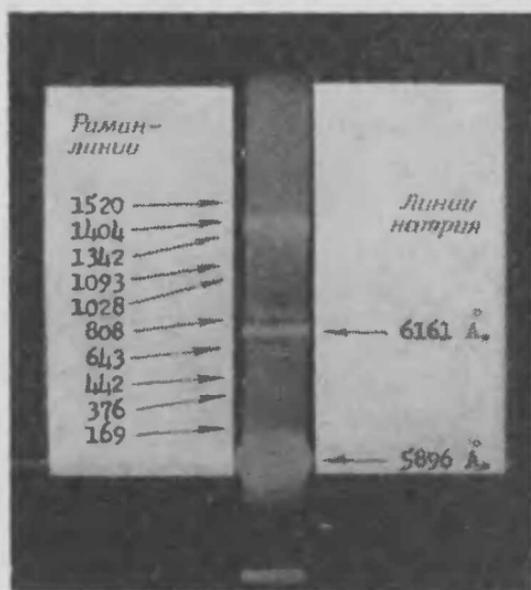
Таким образом, если у нас есть возможность измерить разность частот падающего света и света, рассеянного молекулами вещества, после того как они поглотили коли-

чество энергии, достаточное для совершения вынужденных колебаний, эта разность и есть частота собственных колебаний молекул данного вещества.

Такой метод может быть использован только для прозрачных веществ, когда большая часть падающего света проходит сквозь образец неизменной. «Ослабленные» кванты, появляющиеся после столкновений с молекулами образца, рассеиваются во всех направлениях, причем интенсивность этого рассеянного излучения крайне низка. Его можно фотографировать и по интенсивности и положению новых полос оценивать молекулярные колебания данного вещества (фиг. 20). Однако, для того чтобы собрать и измерить этот рассеянный свет, необходимы очень чувствительные приборы. Методика подобных исследований весьма утомительна и трудоемка, особенно в работе с такими сложными и зачастую нестабильными органическими веществами, какими, по-видимому, является большинство духо́в.

Вибрационная теория Дайсона предполагает, что физическую основу запаха составляет не размер, форма или реакционная способность молекул пахучих веществ, а их колебательные движения. Вообще говоря, эта идея весьма привлекательна, потому что она дает простое и общее объяснение одному из наиболее загадочных явлений, касающихся запаха: вещества, имеющие совершенно разное строение, например мускусы, пахнут очень похоже, тогда как вещества с весьма сходной структурой молекул, например кетоны, пахнут по-разному. Молекула представляет собой, в сущности, набор тяжелых частиц, связанных друг с другом упругими силами. При этом одна и та же колебательная частота может соответствовать самым разнообразным химическим структурам и химическим свойствам.

В 1937 г., когда Дайсон полагал, что открытый незадолго до этого Раман-эффект поставит его гипотезу на экспериментальную основу, были определены характеристические колебательные частоты лишь для очень небольшого числа молекул, да и экспериментальные возможности этого метода были еще весьма ограничены в связи с чрезвычайно сложной техникой исследования. Дайсон сам не был спектроскопистом (иначе он, вероятно, не интересовался бы запахами), поэтому ему пришлось использовать самые разнообразные и весьма многочисленные



Ф и г. 20. Спектр комбинационного рассеяния (Раман-спектр) α -нитрофенола. *Справа*: линия натрия (6161 и 5896 Å). *Слева*: значения волновых чисел для линий комбинационного рассеяния (Раман-линии). На этой фотографии представлен спектр излучения натриевой лампы, рассеянного жидким нитрофенолом. Помимо двух линий с длинами волн 6161 и 5896 Å, соответствующих излучению натриевой лампы, видны линии комбинационного рассеяния (Раман-линии) — некоторые из них едва заметны, представляющие частоты, которые отсутствуют в излучении источника. Их частоты отличаются от частоты возбуждающего излучения (5896 Å) линии натрия и соответствуют колебательным частотам молекул нитрофенола. Ясно, что наблюдение линий комбинационного рассеяния с волновыми числами ниже 169 затруднено. Спектр получен с помощью Hilger f/4 Раман-спектрографа с натриевой лампой в течение двухчасовой экспозиции. Это соединение быстро распадается под действием более коротковолнового излучения, и даже излучение натрия вызывает флуоресценцию, создающую сплошной фон.

данные других исследователей, публикуемые в специальной литературе. На основании собранной информации Дайсон предположил, что осмические частоты, к которым чувствителен нос, соответствуют волновым числам между 1400 и 3500; так, ощущения эфирных запахов вызываются колебаниями с волновыми числами около 2700. Кроме того, Дайсон подчеркивал, что, помимо наличия определенных

характеристических колебательных частот, пахучее вещество должно обладать достаточной летучестью и определенной растворимостью.

Итак, на первый взгляд вибрационная гипотеза кажется довольно правдоподобной, и, кроме того, — что совсем уж непривычно при рассмотрении теорий запаха, — ее можно детально проверить экспериментом. Для этого необходимо лишь сравнить колебательные частоты групп веществ, имеющих похожие запахи, и показать, таким образом, что запах этих веществ соответствует определенным частотам колебаний или комбинациям таких частот.

Но если это все, что необходимо, и методы инфракрасной спектроскопии и комбинационного рассеяния света доступны и пригодны для исследований, почему же их не применяют? Чего мы ждем? Поскольку эта книга частично представляет собой рассказ о том, как в действительности ведутся исследования и что из этого получается, мне придется отвечать на поставленный вопрос, детально излагая историю поисков, ошибок и полуправильных идей, мало отличающуюся от описанной в главе III.

Теория Дайсона сразу привлекла к себе огромное внимание, однако вскоре о ней забыли, потому что ее положение о связи запаха с колебательными частотами молекул, соответствующими значениям волновых чисел от 1400 до 3500, оказалось несостоятельным. Дело в том, что, исходя из этих колебательных частот, нельзя было правильно предсказывать запахи, и, следовательно, эта теория не удовлетворяла самому главному требованию.

В течение последующих двадцати лет никому и в голову не пришло, что основная идея этой теории была правильной, тогда как неправильным могло быть истолкование конкретных колебательных частот как осмических, а в результате с водой выплеснули и ребенка. Сейчас об этом легко говорить, но остается фактом, что многие исследователи, в том числе и автор настоящей книги, несколько лет работали над этой проблемой, не видя того, что сама постановка ее была неправильной.

Выше говорилось, что молекулярные колебания квантованы и что энергия одного колебания должна быть равна по меньшей мере одному кванту. Но источников, из которых молекула может получить эту энергию,

вообще говоря, очень немного. В пламени, например, эту энергию можно получить за счет энергии химической реакции, но в носу же нет пламени. Вне пламени, но рядом с ним молекула может получить энергию за счет излучения, но внутри носа темно, так что радиационное возбуждение колебаний молекул пахучих веществ также исключено. В результате остается один-единственный источник возбуждения молекулярных колебаний — столкновение молекулы пахучего вещества с молекулами азота и кислорода воздуха.

Сила этих межмолекулярных столкновений прямо пропорциональна абсолютной температуре; для условий, существующих в носу, это соответствует примерно $30-35^\circ$, или, по абсолютной шкале, около 300° К. Это довольно низкая температура, и, следовательно, энергии, выделившейся в результате столкновения молекул, хватит лишь на возбуждение низкочастотных колебаний. Величина кванта энергии колебания определяется произведением $h\nu$, поэтому малое количество энергии соответствует малой величине ν (то есть низкой частоте), и наоборот. В 1953 г. я определил число квантов колебательной энергии, которое могло быть получено вибраторами различных частот от столкновения с молекулами воздуха при 300° К. Результаты были следующие:

<i>Волновое число</i>	<i>Среднее число колебательных квантов на молекулу</i>
1000	0,008
800	0,022
600	0,059
400	0,17
200	0,62
100	1,62
50	3,69

Эти данные показывают, что среди молекул, характеристическая частота колебаний которых соответствует волновым числам, равным, например, 1000, только одна из каждых 125 молекул будет колебаться, тогда как остальные 124 будут «молчать» (потому что $1/125 = 0,008$). Для волновых чисел, равных 400, часть активно колеблющихся молекул составляет одну шестую, и лишь начиная с волновых чисел, меньших 200, каждая молекула приобре-

тает за счет столкновений в среднем один квант колебательной энергии.

Таким образом, очевидно, что в результате столкновений молекул пахучего вещества с молекулами воздуха при 300°K существенное значение могут иметь только возбуждения колебаний с волновыми числами ниже 500, а частоты Дайсона в диапазоне волновых чисел 1400—3500 скорее всего вообще не являются осмическими. Последние находятся в диапазоне от 500 до 50.

Вибрационной теории запаха, однако, чрезвычайно не повезло в том смысле, что колебания в этом диапазоне частот почти не изучены.

Одна из причин состоит в том, что фотографируемый спектр рассеянного света включает как очень слабые Раман-линии, так и ту гораздо более сильную линию, которая обусловлена частью пучка света, прошедшего сквозь объект и рассеившегося без изменения частоты. Низкочастотные Раман-линии лежат очень близко к этой интенсивной линии, что сильно затрудняет их наблюдение. По этой причине информация о низкочастотном диапазоне обычно бывает весьма неполной. Аналогично обстоит дело в инфракрасной спектроскопии: частоты с волновыми числами от 500 до 50 соответствуют довольно большим длинам волн (от 20 до 200 микронов), а до самого недавнего времени во всем мире существовало, вероятно, не более полудесятка приборов, с помощью которых можно было бы на должном уровне исследовать эту часть спектра. К тому же владельцы этих приборов использовали их обычно для изучения гораздо более простых молекул, чем молекулы душистых веществ.

Ко всем этим экспериментальным и методическим трудностям следует добавить еще и то, что область колебательных частот молекул, представляющая ценность для вибрационной теории запаха, не вызывала сколько-нибудь значительного теоретического интереса ни у химиков, ни у физиков, которые в большинстве своем не занимаются запахами или не склонны признавать существование связи между запахом веществ и их молекулярными колебаниями.

Вероятно, именно по этим причинам некоторые критики вибрационной теории запаха были далеки от цели. Гипотеза Дайсона может быть верной или неверной, но нельзя отвергать ее лишь на основании того, что не обнаруживается связи высокочастотных колебаний молекул

данного вещества с запахом этого вещества, как это делали критики. Один из исследователей, например, изучал два вещества, имеющих совершенно различные запахи, — метилцианид $\text{CH}_3-\text{C}\equiv\text{N}$ и метилизоцианид $\text{CH}_3-\text{N}=\text{C}$. Было обнаружено, что эти вещества характеризуются следующими колебательными частотами (приведенный список, вероятно, не полон: возможно, существуют еще и другие, пока не открытые дополнительные линии, особенно в низкочастотной области):

Метилцианид	Метилизоцианид
3009,0	3014,3
2965,3	2965,8
2267,3	2166,0
1454,0	1459,0
1400,0	1410,0
1041,0	1130,0
919,9	944,6
361,0	270,0

С позиции вибрационной теории запаха важны, как уже говорилось, только волновые числа ниже 500, и наблюдаемое различие низких частот у названных выше двух соединений наиболее показательно именно с этой точки зрения, в то время как близость более высоких колебательных частот не имеет значения. И все-таки эти соединения называли, чтобы свидетельствовать *против* теории, утверждающей связь запаха и низкочастотных колебаний молекул. Я привел этот пример только потому, что его автора довольно широко цитировали как «копровергнувшего» вибрационную теорию, но делали это в основном исследователи, видевшие только его выводы и не обращавшие внимания на доводы.

Некоторые даже решили, что Дайсон предполагает, будто ощущение запаха создается каким-то образом за счет самого Раман-эффекта. Столь явное непонимание существа вопроса даже трудно себе представить! Поэтому, чтобы исключить возможную ошибку, позвольте мне еще раз суммировать основные положения этой теории.

1. Ощущения запаха возникают в результате каких-то колебательных движений, свойственных молекулам пахучих веществ.

2. Подчиняясь правилам квантования, эти колебания должны иметь довольно низкую частоту и, вероятно, лежать в диапазоне волновых чисел от 500 до 50.

3. Единственно доступные методы экспериментального измерения колебательных движений в молекулах основаны на эффекте комбинационного рассеяния света (Раман-эффекте) и методе инфракрасной спектроскопии.

4. Определив соответствующие колебательные частоты различных пахучих веществ, можно установить связь между запахами веществ и некоторыми частотами или комбинациями частот, характеризующими эти вещества.

5. Природа взаимоотношений молекулярных колебаний пахучих веществ и обонятельных клеток носа не известна, но нет никаких оснований считать, что их взаимодействие как-то связано с эффектом комбинационного рассеяния света или поглощения в инфракрасной области, которые используются просто для определения вибрационных частот.

В следующей главе мы рассмотрим эту теорию подробнее, но хочу предупредить читателя, что я очень симпатизирую этой теории и поэтому изложение не будет беспристрастным.

Общая теория

Если основное положение вибрационной теории Дайсона о существовании «осмических частот» правильно и если верен мой расчет вероятного диапазона значений этих частот, то молекулы веществ с похожими запахами должны характеризоваться сходными низкочастотными колебаниями.

Нитробензол, бензонитрил и α -нитротюфен имеют запахи, несколько напоминающие запах горького миндаля. Низкочастотные колебания, характеризующие эти соединения, представлены в помещенной ниже таблице. В ней приведены, кроме того, колебательные частоты бензальдегида — вещества, запах которого обычно считают очень похожим на запах нитробензола; но в экспериментах, тщательно проведенных нами с участием 15 испытуемых, было показано, что запахи этих веществ лишь отчасти напоминают друг друга. В таблице даются также значения низкочастотных колебаний бутиронитрила: потому, что они очень близки к соответствующим значениям для нитробензола, и еще потому, что первые шесть опрошенных мною участников эксперимента, тщательно понюхав очищенный образец этого вещества, решили, что запах его также похож на запах миндаля.

<i>Нитробен- зол</i>	<i>Бензонит- рил</i>	<i>Нитро- тюфен</i>	<i>Бутиро- нитрил</i>	<i>Бензаль- дегид</i>
176	172	169	179	130
252				225
	320			237
397	381	376	370	
435	405	442		439
532	460		524	
	549			

Я полагаю, что данные этой таблицы довольно убедительно доказывают связь миндального запаха всех этих веществ с их низкочастотными колебаниями. Следовало бы проделать то же самое по крайней мере для десятка раз-

личных запахов и для колебательных частот с волновыми числами ближе к 50. (Вполне возможно, что вещества, представленные в таблице, имеют, помимо указанных, еще и более низкие частоты.)

Число основных частот для любой молекулы можно вычислить теоретически. Если молекула состоит из n атомов, число независимых колебаний, которое она может совершать (обычно называемых ее «нормальными состояниями»), составляет $(3n-6)$, или, для частного случая, когда все атомы расположены на одной прямой, $(3n-5)$. Таким образом, в простейшей молекуле, состоящей из двух атомов (например, O_2 , которую можно изобразить как $O=O$), $3n-5 = 1$ и эти два атома могут двигаться, сближаясь и расходясь, словно соединенные пружиной. В молекуле двуокиси углерода, состоящей из трех атомов, которые располагаются на одной прямой ($O=C=O$), $3n-5 = 4$. Эти четыре состояния молекулы можно представить следующим образом:

1. Атом углерода неподвижен, а два атома кислорода колеблются, одновременно приближаясь к нему либо одновременно отдаляясь.

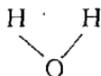
2. Оба атома кислорода неподвижны, а атом углерода колеблется между ними.

3. Оба атома кислорода неподвижны, а атом углерода колеблется в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа.

4. Оба атома кислорода неподвижны, а атом углерода колеблется относительно атомов кислорода вверх и вниз в плоскости чертежа.

(Состояния 3 и 4 будут иметь одинаковую частоту, и их называют «вырожденными», однако они отличаются друг от друга, так как могут существовать независимо.)

Молекула воды имеет V-образную форму:



В данном случае n равно 3, так что $(3n-6) = 3$; колебательные состояния здесь можно описать приблизительно так:

1. Два атома водорода колеблются относительно неподвижного атома кислорода, одновременно приближаясь к нему и удаляясь от него.

2. Один из колеблющихся атомов водорода приближается к атому кислорода, тогда как другой отдаляется от него.

3. Атомы водорода отклоняются в противоположные стороны из плоскости, равновесной конфигурации молекулы. При этом происходит искажение валентного угла.

Для более сложных молекул колебательные движения становятся более сложными; их гораздо труднее описывать словами или схемами, однако число возможных «нормальных колебаний» всегда можно точно определить с помощью формулы (3n—6) или (3n—5). В настоящее время теоретики уже умеют устанавливать соответствие наблюдаемых частот с частотами нормальных колебаний, по крайней мере для довольно простых молекул.

Оказывается, не все линии, наблюдаемые в спектре комбинационного рассеяния или в инфракрасном спектре вещества, представляют основные, или нормальные, состояния молекул. Обнаружены линии, частоты которых являются кратными величинами основных частот или комбинаций их сумм или разностей, возникающих вследствие наложений пар основных колебательных состояний молекул. Вот почему в спектре часто наблюдается большее количество линий, чем число основных колебательных состояний молекул. Частоты составных линий равны приблизительно (но не точно) сумме частот нормальных исходных состояний, и в результате они имеют достаточно большие значения, чтобы выпасть из диапазона интересующих нас осмических частот с волновыми числами от 50 до 500. Гораздо хуже обстоит дело с некоторыми довольно симметричными молекулами, характеризующимися нормальными состояниями, которые по ряду причин не дают инфракрасного поглощения или линий комбинационного рассеяния. Самая низкочастотная из наблюдаемых инфракрасных полос пиридина, например, имеет волновое число 405, однако в спектре комбинационного рассеяния наблюдается более низкая частота с волновым числом 374. Обычный пиридин, между прочим, имеет один из самых сильных и неприятных запахов, однако после тщательнейшей очистки запах становится слабым и отнюдь не неприятным, а то и вовсе исчезает.

С точки зрения теории запаха следовало бы попытаться найти связь запаха с колебательными частотами

нормальных состояний молекулы пахучего вещества, но если они не известны из-за отсутствия детальных сопоставлений наблюдаемых частот и основных состояний, то в качестве первого, ориентировочного приближения придется использовать значения колебательных частот по данным инфракрасной спектроскопии или спектров комбинационного рассеяния.

Описанный момент весьма существен, поскольку он еще раз подчеркивает, что ощущение запаха вызывается именно молекулярными колебаниями, а не эффектами комбинационного рассеяния или поглощения в инфракрасной области, которые являются лишь индикаторами, позволяющими устанавливать и оценивать эти молекулярные колебания.

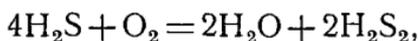
Критики так часто неправильно трактуют это положение обсуждаемой теории, что я вынужден проиллюстрировать его еще одним примером. Вибрацию барабана можно воспринимать как шум, ее можно ощущать, прикасаясь к барабану пальцами, или, наконец, сделать видимой, положив на натянутую кожу несколько сухих горошин. Таковы три разных способа обнаружения вибрации барабана с использованием соответственно ушей, пальцев или глаз. Аналогично этому эффект комбинационного рассеяния, инфракрасная спектроскопия или нос представляют собой три разных способа регистрации молекулярных колебаний.

Возможность подсчета общего числа «нормальных состояний» и, следовательно, числа соответствующих им характеристических колебательных частот с самого начала создает определенные затруднения для вибрационной теории запаха. Действительно, несколько веществ с очень простыми молекулами, обладая хорошо известными запахами, вообще не имеют низкочастотных колебаний; наиболее важны из них следующие:

H_2S	HCN	NH_3
1290	712	932
2611	2089	968
2684	3312	1628
		3336
		3338
		3414

Существование этих веществ создает довольно серьезные, но не непреодолимые препятствия обсуждаемой нами теории.

В присутствии воды сероводород может окисляться (обычно это происходит довольно медленно) с образованием воды и серы. Известно, что в процессе такого окисления образуются некоторые промежуточные продукты, согласно таким, например, реакциям:



Двусернистый водород H_2S_2 , являющийся аналогом перекиси водорода, и другие полисернистые водороды уже обнаруживают в спектре комбинационного рассеяния низкочастотные линии:

H_2S_2	H_2S_3	H_2S_4
509	210	185
883	483	229
2509	862	450
	2502	483
		862
		2501

До сих пор я не придумал, как доказать, что H_2S_2 или H_2S_3 действительно образуются в наших носгах, когда мы вдыхаем смесь сероводорода с воздухом, но можно сослаться на два случая, когда сами эксперименты говорят о такой возможности. Первый — это результаты исследований Баради и Борна, которые обнаружили в мембранах обонятельной слизистой довольно много разнообразных ферментов, — правда, они не обязательно локализируются в собственно обонятельных клетках, но и входят в различные сопутствующие ткани. В их число, по-видимому, входят и некоторые окислительные ферменты (оксидазы). Кроме того, известно, что сероводород очень ядовитый газ; он столь же токсичен, как и цианистый водород HCN , но совсем не так опасен, потому что запах обычно заранее предупреждает о его появлении. Поскольку этот газ токсичен, он должен быстро реагировать с тканями, с которыми соприкасается. Таким образом, случай с сероводородом не создает совершенно непреодолимого препятствия нашей теории.

Что касается синильной кислоты HCN , она также представляет собой газ весьма активный в химическом отношении и очень токсичный, а то, что некоторые неспособны ощущать его запах, указывает на возможное отсутствие у них специального приспособления, посредством которого могла бы восприниматься осмическая частота синильной кислоты.

«Запах» аммиака, когда он достаточно силен, создает (в основном или полностью) болевое ощущение, и даже при достаточно больших разведениях боль может оставаться главным компонентом ощущения, комбинируясь еще, возможно, с ответом на щелочную реакцию, характерную для растворов этого хорошо растворимого газа.

Помимо затруднений, возникающих с немногочисленными веществами типа трех только что рассмотренных, вибрационная теория вполне удовлетворительно объясняет разнообразнейшие явления, описанные мною в предшествующих главах.

Так, например, частичное или полное сходство запахов оптических изомеров, о котором шла речь в главе XV, можно было бы точно предсказать на основе вибрационной теории запаха. Колебательные частоты нормальных состояний левых и правых форм вещества совершенно одинаковы, и поэтому запахи этих соединений тоже должны быть совершенно одинаковыми, до тех пор пока молекулярная асимметрия не позволит одной из форм несколько более плотно присоединиться к асимметричным молекулам обонятельных клеток. В подобных случаях появляется небольшое отличие в интенсивности запаха или в его «оттенке», однако разница между двумя членами пары оптических изомеров никогда не бывает очень большой.

Что касается информационной емкости обонятельной системы (обсуждавшейся в главе XI), то вибрационная теория является первой и единственной теорией обоняния, которая удовлетворяет всем требованиям, вытекающим из представлений об информационной емкости. Диапазон частот со значениями волновых чисел от 50 до 500 включает несколько более трех «октав». У фортепьяно это соответствует 35—40 полным тонам, и если «ширина полос» отдельных осмических частот составляет примерно ту же величину, что и у фортепьяно, то можно

Если рецепторы, рассчитанные на восприятие определенных осмических частот, не временно утомлены, а вообще отсутствуют от рождения, то мы будем иметь точно такие же случаи частичной аносмии, какие описывали Блэйкли (глава XIII) или Гилло (глава XVI).

Вибрационная теория запаха, кроме того, объясняет много фактов, описанных довольно детально в предыдущих главах. Тонкое воздействие примесей на запахи веществ очень важно для парфюмеров, гастрономов и знатоков вин. Известны случаи, когда два запаха с определенными осмическими частотами при смешении в подпороговых количествах дают неожиданно богатый результат. В других случаях удаление определенной частоты, которую вносит примесь, может максимально «очистить» запах.

Если вибрационная теория запаха получит прочную основу в виде строгой связи определенных низкочастотных колебаний с характером запахов веществ или способностью веществ привлекать определенных насекомых или рыб, откроется огромное поле для исследовательской деятельности в этой области.

Сейчас необходимо, пожалуй, рассмотреть лишь один вопрос, а именно возможный путь взаимодействия колеблющихся молекул пахучего вещества с обонятельными клетками — тот процесс, в результате которого возникает возбуждение в аксонах, направляющихся в обонятельную луковицу. Я начал эту книгу с рассказа о том, как в действительности выполняется научное исследование, и закончить ее хотел бы тем же.

Когда я впервые начал думать и говорить о молекулярных колебаниях как о причине запаха, химики постоянно спрашивали меня, каким образом молекулярные колебания, особенно низкочастотные, то есть с малой энергией, могут вызывать возбуждение в нерве. Если я обращался с этим вопросом к специалистам-нейрофизиологам, они давали мне, в сущности, один ответ: «К сожалению, мы ничем не можем вам помочь. Дело в том, что мы вообще не знаем, как возникают сигналы в нерве».

При всей своей бесполезности этот ответ открывал широкие возможности для всякого рода предположений и гипотез. К счастью, мои друзья любезно согласились помочь мне в этом деле, особенно доктор Рид, который подробно и творчески обдумал эту проблему.

Я предоставил ему фактический материал, касающийся вопросов обоняния, а он внес в решение проблемы широкую эрудицию химика и знания энергетики процессов, происходящих в живом организме. После многочасовой дискуссии (которая часто выходила за пределы обеденного перерыва, а огромным количеством исписанной бумаги можно было покрыть весь пол лаборатории) мы пришли к некоторой теории пускового механизма, которая представлялась нам довольно обоснованной. Теперь нужно было расписать ее в деталях и попросить разных специалистов просмотреть ее и сделать необходимые замечания. Большинство из них вежливо заметили, что теория не лишена интереса, и только один, покойный доктор Эванс, заинтересовался всерьез. Он потратил несколько дней и ночей на детальные расчеты, которые показали, что теория в том виде, в каком она разработана, не способна объяснить существование очень низких порогов восприятия для многих запахов (глава VII). Развив нашу основную идею несколько по-иному, доктор Эванс преодолел эту трудность. Все растянулось более чем на шесть месяцев, причем за многие дни и ночи трудов мы уничтожили огромное количество бумаги.

В результате была создана теория обонятельного возбуждения, которую можно считать правильной или неправильной, но она согласуется с большей частью данных из химии, физики, физиологии и анатомии, а также с известным фактическим материалом, касающимся обоняния.

Мы исходили из того, что мембраны обонятельной слизистой носа отчетливо окрашены в желтый или коричневый цвет веществом, называемым обонятельным пигментом. Состав и строение этого вещества не известны, но, по сведениям ряда авторов, оно присутствует в большом количестве в соответствующих тканях животных, у которых хорошо развито обоняние. Мы почувствовали, что присутствие в обонятельных клетках окрашенного вещества может иметь большое значение: совсем не потому, что восприятие запаха каким-то образом связано с восприятием цвета, но вследствие того, что цвет окрашенных веществ зависит от определенных особенностей их структуры, а эта структура может иметь непосредственное отношение к нашей проблеме.

Вещество обладает видимой глазом окраской, если молекулы его избирательно поглощают свет определенной

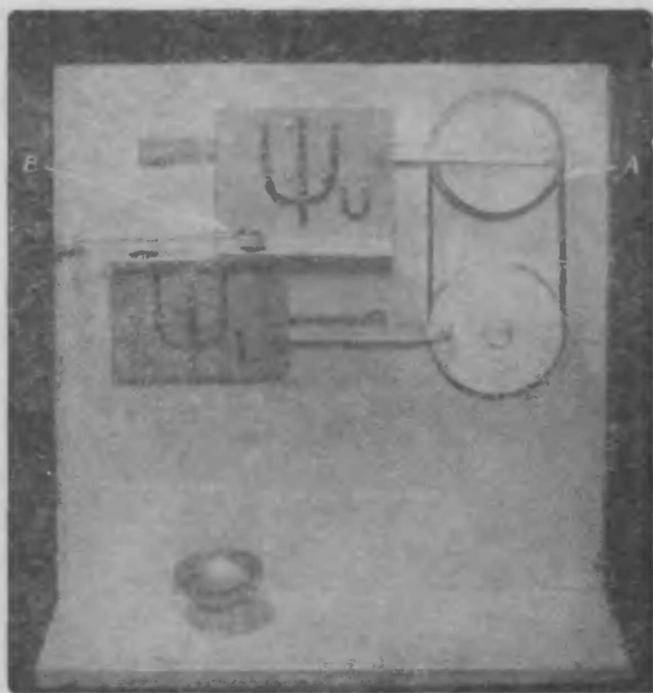
длины волны. (Белый свет включает все длины волн, и, если исключить из него какие-то волны, оставшаяся часть обязательно будет окрашенной.) Способность поглощать свет определяется присутствием в молекулах вещества электронов, способных поглощать лучистую энергию источника и в результате возбуждаться, переходя на более высокий, или возбужденный, уровень. Таким образом, окраска обонятельной ткани свидетельствует, что эта ткань содержит вещество с легковозбуждаемыми электронами. Поскольку в полости носа темно, молекулы этого пигмента не могут возбуждаться за счет поглощения света, но они с не меньшим успехом могут возбуждаться за счет поглощения энергии химических реакций, которые всегда идут в живых клетках обонятельной ткани.

Обычно возбужденные электроны довольно быстро возвращаются в основное состояние. Однако иногда они возвращаются с значительным опозданием, потому что такой переход оказывается запрещенным. (Примером может служить явление фосфоресценции: энергия возбуждения светом некоторое время сохраняется в веществе и высвобождается довольно медленно, вызывая свечение в темноте после выключения света.) Физическая теория таких электронных переходов довольно хорошо известна, и возвращение электрона определяется (или описывается) математическим выражением, называемым интегралом момента перехода (фиг. 21):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_U^* M \psi_L dt.$$

Если значение этой функции равно нулю или бесконечно малой величине, возвращение возбужденного электрона в основное состояние запрещено, а если значение функции велико, возвращение электрона происходит мгновенно. Следовательно, этот интеграл определяет возможность осуществления перехода электрона.

Это выражение по крайней мере в двух случаях могло бы обратиться в нуль. В одном случае необходимо, чтобы часть интеграла от $-\infty$ до 0 была строго равна и противоположна по знаку другой части, от 0 до $+\infty$. Для этого молекула интересующего нас пигмента должна быть совершенно симметричной. Это наше первое предположение было отвергнуто доктором Эвансом, который указал,

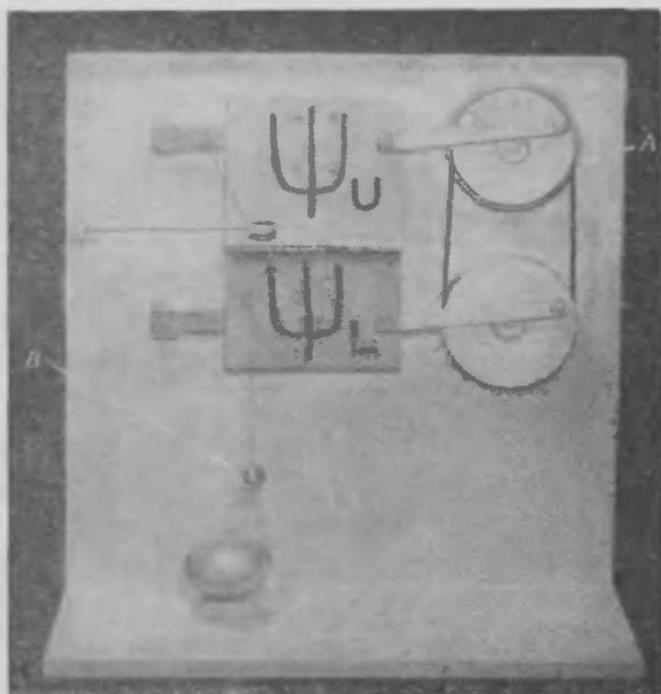


Ф и г. 21а. Механическая модель интеграла момента перехода. Две волновые функции представлены двумя металлическими пластинами, которые соединены кривошипами с двумя шкивами одинакового диаметра (А). При вращении шкивов пластины совершают возвратно-поступательные движения, то есть колеблются с одинаковой частотой. Каждая пластина имеет отверстие, расположенное таким образом, что стальной шарик (В) может проскочить сквозь них только в том случае, если обе пластины в движении одновременно достигнут крайнего положения, то есть совпадут по фазе. Пока будет сохраняться условие, представленное на этой фотографии, шарик упасть не может.

что интеграл равен нулю, если величина ψ_U^* всегда равна нулю, когда ψ_L не равна нулю, и наоборот.

Символами ψ_U^* и ψ_L обозначены колебания (точнее говоря, волновые функции) молекулы пигмента в ее высшем, или возбужденном, состоянии и соответственно низшем, или основном, состоянии. Когда одна величина равна нулю, а другая в это время не равна ему, они, выражаясь научным языком, не перекрываются.

Этому трудно дать простое физическое объяснение; можно только сказать, что две волновые системы не будут



Ф и г. 216. Механическая модель интеграла момента перехода (*продолж.*). Если изменять размер одного из шкивов (А), два осциллятора будут совершать возвратно-поступательные движения с различными частотами. Более «быстрый» осциллятор будет нагонять более «медленный», и время от времени их колебания будут совпадать по фазе. Когда их движения совпадут по фазе, стальному шарикю будет «разрешен» переход на нижний уровень.

перекрываются в том случае, если они постоянно не совпадают по фазе: одна всегда будет вверху, когда другая — внизу. Это происходит, только когда два ряда волн имеют совершенно одинаковую частоту.

Нам представляется, что молекула обонятельного пигмента довольно легко может переходить из основного электронного состояния в возбужденное, причем ее волновые функции имеют строго одинаковую частоту как в высшем, так и в низшем состоянии. Если такая молекула переходит в возбужденное состояние, она способна долго оставаться в нем. Более того, за счет перехода электронов на возбужденный уровень она становится электрически полярной. Если эта молекула находится в мембране обонятельной клетки, ее полярность будет, вероятно, уравни-

вешиваться поляризацией мембраны нервной клетки. Если что-то заставит электрон молекулы обонятельного пигмента вернуться в основное состояние, это вызовет местную деполяризацию, которая, как мы видели в главе XII, по-видимому, и является началом нервного импульса.

Далее нужно выяснить, каким образом близкое присутствие молекул пахучего вещества может изменить степень перекрывания высшей и низшей волновых функций, что позволило бы электрону вернуться в основное состояние.

Хорошо известно, что две колеблющиеся системы, связанные между собой, более или менее сильно взаимодействуют, или резонируют, если частота их колебаний одинакова или почти одинакова. Количественное исследование резонанса показывает, что резонансная частота несколько отличается от частот колебаний не связанных между собой вибраторов. В зависимости от силы связи между вибраторами резонансная частота отличается в большей или меньшей степени от отдельных частот этих двух осцилляторов.

Отсюда следует, что, если колеблющаяся молекула пахучего вещества каким-то образом связывается с молекулой обонятельного пигмента и если их вибрационные частоты одинаковы или почти одинаковы, они будут резонировать и при этом резонансная частота будет отличаться от нормального значения ψ_U^* молекулы обонятельного пигмента. Тогда между частотами ψ_U^* и ψ_L будет иметь место некоторое перекрывание, а это разрешит переход электрона с возбужденного уровня на нормальный.

В связи с этим наше представление о первичном детекторе запаха у насекомого или другого животного, чувствительного только к одной осмической частоте, выглядит довольно просто: обнаженные стенки нервных клеток содержат молекулы пигмента, чье возбужденное состояние может быть снято контактом с молекулой, имеющей определенную частоту колебаний, противоположную таковой в пигменте. Это, между прочим, вполне объясняет, почему некоторые вещества действуют на определенных насекомых как половые аттрактанты, хотя химически они могут не иметь никакого отношения к истинному половому аттрактанту.

Животное с развитым обонятельным аппаратом, то есть способное к более разностороннему сбору информации, в принципе имеет, вероятно, такое же устройство для восприятия запаха, но усложненное за счет присутствия нескольких видов обонятельных клеток, каждая из которых чувствительна к определенной частоте. Это возможно в том случае, если структура молекул обонятельного пигмента, а следовательно, и воспринимаемые ими колебательные частоты хотя бы незначительно различаются для клеток разных типов. У животного с двадцатью пятью типами нервных окончаний, чувствительного к двадцати пяти «первичным» запахам, должно было бы существовать двадцать пять вариантов основной структуры молекулы обонятельного пигмента. Хотя это и невероятно, но наблюдаемый в действительности коричневый цвет обонятельных тканей согласуется скорее с наличием множества разных веществ, поглощающих свет, чем с каким-то единственным типом, который дал бы, вероятно, красный, желтый, зеленый или синий цвет, а не коричневый.

Частичная anosmia в таком случае связана просто с врожденной неспособностью организма производить определенные варианты молекулы обонятельного пигмента.

Такая теория вполне объясняет существование очень низких пороговых концентраций у многих пахучих веществ, особенно при рассмотрении этих фактов в связи с идеями Дэвиса и Тэйлора, описанными в главе XIII. Эти авторы вычисляли значения пороговых концентраций, учитывая тенденцию молекул скапливаться на определенном участке клеточной поверхности и их способность к пробиванию клеточной мембраны. Они предполагали, что пробивающая способность прямо пропорциональна площади поперечного сечения молекулы. Согласно нашей теории, значения пороговых концентраций можно было бы рассчитывать почти таким же образом, за исключением того, что там, где они использовали площадь поперечного сечения молекулы, мы использовали бы силу связи между молекулой пахучего вещества и молекулой обонятельного пигмента. Эта сила, вероятно, была бы связана — по крайней мере частично — с размером молекулы пахучего вещества, так что численное соответствие пороговых концентраций, рассчитанных Дэвисом и Тэйлором, наблюдаемым в эксперименте вовсе не удивительно.

и, обдумав этот вопрос, мы пришли к выводу, что таким требованиям более всего удовлетворяет вещество, по структуре напоминающее витамин А. Мы отметили это в нашей статье, сославшись на сообщение Ле Магнена и Рапопорта о том, что крысы, в рацион которых не входит витамин А, утрачивают способность чувствовать запахи.

Бриггс и Дункан в Австралии воспользовались этой идеей и, проанализировав ткани собак и коров, обнаружили в обонятельных клетках присутствие значительного количества витамина А (или очень похожего на него вещества). Тогда они отыскали 56 человек с неосложненной аносмией (неспособностью воспринимать запахи даже при неповрежденном обонятельном аппарате) и ввели им (внутримышечно) большие дозы витамина А. В результате у 50 человек из 56 обоняние полностью или частично восстановилось.

Вскоре после этого другой ученый, используя другой, возможно менее специфичный метод анализа, исследовал обонятельные ткани одной коровы, 61 крысы и трех свиней. Доказательства присутствия витамина А он обнаружил только в ткани коровы и поэтому сделал вывод, что обонятельный пигмент не имеет ничего общего с витамином А. Но он умудрился сделать и дальнейшие выводы: будто его результаты показывают, что обонятельный пигмент никакого отношения к обонянию не имеет и, стало быть, всю вибрационную теорию следует признать неверной!

Весьма возможно, что теория и неверна, однако неудача с поиском витамина А в обонятельных клетках этого не доказывает.

Описанные два случая еще раз показывают, чем полезна хорошая теория: она стимулирует постановку экспериментов, которые иначе могли бы и не состояться. Эти случаи свидетельствуют также, что в целом проблема запахов и обоняния находится в очень здоровом состоянии, поскольку вопросов в ней гораздо больше, чем ответов, причем путей для поисков ответов в настоящее время больше, чем когда-либо. Дальнейшие годы принесут новые успехи и интересные открытия, которые, несомненно, покажут, что некоторые «факты» и многие идеи, высказанные в этой книге, были неверными.

Литература

К главе III

- В е р о з а М., Insect Attractants are Taking Hold, *Agricultural Chemicals*, 37-40, July, 1960.
- Д е т х и е р V. G., *Chemical Insect Attractants and Repellents*. Blakiston Co., Philadelphia, 1947.
- К е н н е д у J. S., The Visual Responses of Flying Mosquitoes, *Proc. Zool. Soc., Ser. A*, 109, 221—242, 1939.
- С у т т о н O. G., The Problem of Diffusion in the Lower Atmosphere, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 73, 257—280, 1947.
- С у т т о н O. G., The Application to Micrometeorology of the Theory of Turbulent Flow Over Rough Surfaces, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 75, 335—350, 1949.
- В р и г х т R. H., The Olfactory Guidance of Flying Insects, *Canadian Entomologist*, 90, 81—89, 1958.

К главе IV

- Ф р а е н к е л G. S., Г у н н D. L. *The Orientation of Animals, Kineses, Taxes and Compass Reactions*. Dover Publications, 1961.
- К е л л о г г F. E., В р и г х т R. H., The Olfactory Guidance of Flying Insects. III. A Technique for Observing and Recording Flight Paths, *Canadian Entomologist*, 94, 486—493, 1962.
- К е л л о г г F. E., Ф р и з е л D. E., В р и г х т R. H., The Olfactory Guidance of Flying Insects. IV. *Drosophila*, *Canadian Entomologist*, 94, 884—888, 1962.
- В р и г х т R. H., The Olfactory Guidance of Flying Insects, *Canadian Entomologist*, 90, 81—89, 1958.

К главе V

- А т к и н с M. D., An Interesting Attractant for *Priacma serrata* (Lec.), *Canadian Entomologist*, 89, 214—219, 1957. (Attraction by bleach.)
- В р у е с C. T., Vespid Wasps (*Eumenes curvata*) Attracted to (cigarette) Smoke, *Psyche*, Camb. Mass., 57, 114—115, 1950.
- В у т е н а н д т A. (Active Substances from Insects.) *Naturwissenschaften*, 46, 461—471, 1959.