

28.9

Д 38

A1279191

В МИРЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Л. ДЕТАРИ, В. КАРЦАГИ

# БИОРИТМЫ

Современные представления  
о периодических изменениях  
биологических процессов



ИЗДАТЕЛЬСТВО МИР МОСКВА

DÉTÁRI LÁSZLÓ, KARCAGI VERONIKA

# **Bioritmusok**

NATURA

**В мире науки и техники**

**Л. ДЕТАРИ, В. КАРЦАГИ**

# **БИОРИТМЫ**

**Перевод с венгерского  
Ю. А. ДАНИЛОВА**

**под редакцией  
д-ра биол. наук  
В. Б. ЧЕРНЫШЕВА**

**Послесловие  
д-ра мед. наук  
проф. Ю. А. РОМАНОВА**

**МОСКВА «МИР» 1984**

ББК 28.073  
Д38  
УДК 576.2

**Детари Л., Карцаги В.**

Д38 Биоритмы: Пер. с венг./ Предисл.  
В. Б. Чернышева; Послесл. Ю. А. Романо-  
ва.—М.: Мир, 1984.—160 с., ил.—(В мире науки  
и техники)

Книга венгерских авторов, в популярной форме освещающая наиболее важные и представляющие всеобщий интерес вопросы современного учения о биологических ритмах.

Для широкого круга читателей.

Д 201040000-429 137-84, ч. 1  
041(01)-84

ББК 28.073  
57.04

*Редакция научно-популярной и научно-фантастической  
литературы*

---

Ласло Детари, Вероника Карцаги

**БИОРИТМЫ**

Научный редактор Р. В. Дубровская.

Мл. научный редактор М. А. Харузина.

Художник Г. М. Чаховский.

Художественный редактор В. Б. Прищепа.

Технический редактор Т. А. Максимова.

Корректор Т. П. Пашковская

ИБ № 3913

Сдано в набор 15.02.84. Подписано к печати 23.08.84. Формат 84 × 108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Объем 2,50 бум.л.  
Бумага офсетная № 1. Гарнитура таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,40. Усл. кр.-отг. 17,23.  
Уч.-изд. л. 8,91. Изд. № 12/2417. Тираж 100 000 экз. Зак. 204. Цена 55 коп.

Издательство «Мир»

129820, Москва И-110, ГСП 1-й Рижский пер., 2

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при  
Государственном комитете СССР по делам издательств,  
полиграфии и книжной торговли.  
г. Можайск, ул. Мира, 93.

---

© Détári László, Karcagi Veronika, 1981  
© Перевод на русский язык, «Мир», 1984

## Предисловие редактора перевода

Современная биоритмология — это наука, рассматривающая ритмические процессы от самого их зарождения в таинственных глубинах клетки до таких сложных и крупномасштабных явлений, как лунные и сезонные ритмы в жизни природы.

Прочитав на обложке заголовков «Биоритмы», вы открываете книгу, скорее всего, с надеждой, что, быть может, ученые наконец разобрались в эмоциональных, физических и интеллектуальных биоритмах человеческого организма и подскажут вам, в какой день лучше пробежать марафонскую дистанцию или защищать докторскую диссертацию, а в какой — заранее принимать валидол. Авторы весьма критически отнеслись к этой проблеме, поскольку точного расчета ритмов наука дать не может. И дело отнюдь не в слабости современной биологии, а в принципе, согласно которому организована природа.

Любой биоритм — это не предписание, данное откуда-то свыше, не воинский устав и даже не бесцеремонный будильник. Мы настолько привыкли к жестким связям, к зубчатым

колесам, сцепленным друг с другом, что ищем подобное и в природе, и в самих себе. Однако организация природы куда более сложна. Жестко детерминированная система была бы беспомощной и жалкой в природе, где все так похоже и так бесконечно разнообразно, где все закономерно и ничто не повторяется. Поэтому биологический ритм, с одной стороны, должен быть устойчив и по возможности независим от случайных воздействий и состояния организма (плохи были бы те часы, которые показывали бы время в зависимости от настроения их обладателя), а с другой — должен все время подстраиваться к конкретным условиям среды, чтобы дать организму максимальные возможности к адаптации.

Нет такого биологического ритма, который совсем не зависел бы от условий, окружающих организм. Вы не задумывались над тем, почему без всякого будильника утром начинает звенеть в небе жаворонок, раскрываются цветы, вылетают из улья пчелы? Это не привычное нам точное расписание: «Подъем в 6 часов утра», а каждый день — немно-

го разное время в зависимости от погоды, времени года, состояния самого организма.

Итак, биоритм — это не часы, тикающие на руке их обладателя, а особый механизм, позволяющий организму оптимально приспособиться к меняющимся условиям.

Как происходит подстройка биоритма к условиям среды? В каждом ритме, как правило, запрограммированы интервалы времени, когда организм особенно чувствителен к определенным изменениям внешних условий. И в зависимости от их изменений именно в это время фаза ритма сдвигается либо вперед, либо назад, как бы подлаживаясь к ним. Мы назвали эти интервалы времени временем потенциальной готовности. Подобные сдвиги фазы ритма возникают в каждом цикле. Отсюда вытекает очень важный вывод, что у биоритма нет четко определенного периода, но есть диапазон, в пределах которого этот период может меняться в зависимости от условий.

Так, в наглухо закрытом термостате и при постоянном режиме освещения (в темноте или на свету) животные и растения удивительно точно отмеряют интервалы времени, близкие к суточным. Но величина этих интервалов зависит от уровня освещенности: в темноте они не такие,

как на свету. Авторы пишут о так называемом правиле Ашоффа, согласно которому изменение периода циркадного ритма в таких постоянных условиях зависит от образа жизни животного: с увеличением уровня освещенности у дневных животных он убывает, у ночных — возрастает.

Однако исключений из правила Ашоффа почти столько же, сколько фактов, его подтверждающих. И дело оказывается не в том, дневной образ жизни ведет животное или ночной, а в том, как соотносятся друг с другом задержки или опережения фазы отдельного времени потенциальной готовности в циклах.

Какова же роль биоритмов? Прежде всего биоритмы (не все, но многие) помогают организму согласовывать свою деятельность с меняющейся средой. Кроме того, в организме одновременно протекают сотни тысяч самых разнообразных процессов, которые обязательно должны быть так или иначе согласованы друг с другом. Биоритмы и есть то «расписание», по которому работает вся эта сложная система. Только, как мы уже отмечали, согласованность эта не абсолютна: масса клеток и их комплексов плохо слушают центральную команду — «на месте им виднее». Да и среди идущих в организме процессов часто

встречаются противоположные по своему характеру. И вот ритм работает подобно светофору, который поочередно пропускает поток машин то в одном направлении, то в другом. Если светофор сломается, возможны катастрофы.

Мы привыкли к тому, что каждой функцией управляет свой центр. Организм способен измерять время, значит, в нем есть биологические часы. И опять это не слишком удачная аналогия с нашими в общем-то примитивными техническими устройствами. Да, авторы книги довольно подробно пишут о центрах, заведующих службой времени у некоторых животных. Но все это центры, управляющие суточной ритмикой. В организме же масса самых разнообразных ритмов: и с периодом в несколько часов, и недельные, и лунно-месячные, и годовые. Да и сами суточные ритмы не есть результат деятельности только одного центра. Давно уже было установлено, что вырезанные из кишечника хомяка и положенные в теплый физиологический раствор кусочки сокращаются с суточным периодом. А ведь ведущий центр у грызунов находится в мозгу. У некоторых насекомых два мозговых центра: левый и правый. Обычно они работают синхронно, но если, например, освещать левый глаз, а правый затемнять, то для

одной половины головы будет день, а для другой — ночь. Так что биологические часы в общем оказались «размытыми» по всему организму.

Никто не может сомневаться в том, что биоритмы есть, что их много и что они разные. Но источников биоритмов по сути только два. Во-первых, генераторы некоторых биоритмов находятся в самом организме, во-вторых, биоритмы могут возникать как реакция на изменение внешних условий. Мышь сидит в клетке в термостате, и днем и ночью она освещена одной тусклой лампой, и все же ее поведение ритмично. Не говорит ли это о том, что она воспринимает какие-то геофизические факторы, например суточные изменения геомагнитного поля, проникающего сквозь стены лаборатории? Против подобного происхождения биоритма существует весьма весомое возражение — ритм в таких постоянных условиях перестает быть строго суточным. Живые часы начинают спешить либо отставать, и в результате их ход перестает соответствовать местному времени. Можно, конечно, возразить, что постоянные условия в этом случае только регулярно сдвигают стрелки (фазу наблюдаемых процессов), а центральный механизм, который воспринимает синхронизирующий сигнал, продолжает рабо-

тать в такт с местным временем.

Но вот другие факты. На исследовательской станции, расположенной на Южном полюсе Земли, ритмы у животных оставались в постоянных условиях освещения и температуры точно такими же, как и в лабораториях на других широтах. Как же объяснить, что при выключенном внешнем факторе — ведь смены дня и ночи на Южном полюсе нет — ритм продолжает существовать? И еще. При перевозе дрозофил из одного часового пояса в другой, например из Владивостока в Москву, насекомые, находившиеся в условиях постоянной темноты и постоянной температуры, могли бы получать геофизическую информацию о новом местном времени, но остались верны владивостокскому времени. Как объяснить, что фаза внешнего воздействия сдвинулась, а ход внутренних часов не изменился?

Таким образом, очень маловероятно, что изменения геофизических факторов могут быть источником биоритма. Ис биологической точки зрения это понять легко. Биоритм — очень важное для организма приспособление. В принципе в основу биоритма можно было бы положить и восприятие слабых геофизических сигналов, проникающих даже под

землю, если бы только они не были столь ненадежными. Достаточно, например, небольшого геомагнитного возмущения, даже не магнитной бури, чтобы суточные ритмы большинства геофизических процессов оказались полностью искаженными.

Итак, каждая клетка, каждый орган, каждый организм, каждое сообщество организмов имеет свою не только пространственную, но и временную организацию. Если это так, то их чувствительность к внешним воздействиям должна меняться во времени. Тогда любое лекарство, любое облучение, любое хирургическое вмешательство в зависимости от времени может дать разный, а иногда и противоположный эффект.

Правильно подобрав режимы освещения, температуры и ряда других факторов, наиболее соответствующих биоритмам, можно повысить в несколько раз жизнеспособность и продуктивность разводимых нами животных и растений, причем без каких-либо дополнительных затрат.

Мы еще только начинаем понимать, насколько велики эти резервы. Но нет сомнений в том, что глубокое проникновение в биоритмическую структуру организма принесет человечеству много пользы.

*В. Б. Чернышев*



## Предисловие

Для весьма многих проявлений жизнедеятельности характерна правильная повторяемость, периодичность. Мы считаем вполне естественным и ничуть не удивляемся, когда, например, ощущаем вечером сонливость и отправляемся спать, подчиняясь по существу своим биологическим часам. Еще более понятным и не требующим особых пояснений кажется нам появление с наступлением темноты ощущения усталости, которое, собственно, и вызывает сонливость. Но если человек на протяжении нескольких недель находится, ничего не делая, в полутемном помещении, куда не проникают никакие звуки, то и тогда он будет засыпать и просыпаться примерно каждые 24 часа, как бы отмеряя сутки за сутками.

В жизнедеятельности растений и животных помимо сна немало других проявлений суточного и годичного ритмов. Такие процессы наблюдаются у всех организмов — от одноклеточной водоросли до бурого медведя. Большинство биоритмов обусловлено не периодическими воздействиями внешней среды, а подчиняется каким-то неизвестным нам

биологическим часам. Этот механизм не просто откликается на внешние раздражения, а приспосабливается к внешней среде более тонким и совершенным способом, так как в живом организме необходимые подготовительные реакции происходят еще до изменения внешних условий, например до наступления темноты.

Начиная с шестидесятых годов нашего века исследование биоритмов стало развиваться ускоренными темпами, но ответ на главный вопрос — что такое биологические часы? — получить пока так и не удалось. Правда, теперь нам стало очень многое известно об особенностях биоритмов, о способах воздействия на них и о возможностях их широкого применения. Например, внимание медиков не может не привлечь открывающиеся заманчивые перспективы исследования суточного хода изменения чувствительности человека к принимаемым лекарствам, хирургическому и другим видам вмешательства. Для спортсменов и артистов было бы важно выяснить, почему после дальней дороги по маршруту, пересекающему несколько часовых

поясов, люди на протяжении двух-трех дней не могут обрести привычную форму. Работа в ночную смену отрицательно сказывается на согласованности ритмов. Результаты научных исследований помогают рационально перестроить организацию труда. Внедрение научных рекомендаций в практические приемы, используемые в растениеводстве и животноводстве, позволяет получать от растений и животных дополнительную продукцию в неурочное время (например, заставлять кур нестись в период, когда они обычно не несутся, вызывать раннее цветение и созревание овощей и т. д.).

Даже из этого краткого перечня ясно, какое важное значение для организма имеют биологические ритмы, или биологические часы. Поэтому мы очень обрадовались, когда нам представилась возможность посвятить столь интересным вопросам небольшую книгу. В отличном расположении духа мы отнесли готовую рукопись в редакцию. Мы считали, что выбранная нами тема требует для своего раскрытия не только научных обоснований,

доводов и контрдоводов, но и поясняющих суть дела рисунков, выстроенных в определенной последовательности. Но редактор толстым карандашом перекроил главы, увеличил раз в десять мушек, раков и червей, одним жирным росчерком убрал из книги все отряды птиц, и наши пояснительные рисунки превратились просто в иллюстрации. После такого разгрома нам не оставалось ничего другого, как умыть руки. Вместе с тем мы считаем своим долгом признать, что много интересного нам пришлось изъять «добровольно» из-за недостатка объема книги. В процессе сокращения рукописи отсеялись отдельные группы животных, подробности, интересные для специалистов, различные теории. Поэтому мы просим о снисхождении у специалистов и знатоков за неизбежные пробелы, а у неспециалистов, интересующихся затронутыми нами вопросами, — за отдельные места в изложении, перегруженные информацией, которые могли ускользнуть от цепкого глаза и безжалостного карандаша редактора.

*Л. Детари  
В. Карцаги*

## Некоторые основные понятия

В процессе эволюции животного и растительного мира, длившейся миллиарды лет, выжили те организмы, которые сумели наилучшим образом приспособиться к окружающей среде. К неживым компонентам биосферы относятся температура, ветер, освещенность и многие другие факторы. Одни из них в достаточном приближении вполне допустимо считать постоянными, другие подвержены периодическим изменениям в течение суток, месяца, года. Так, от Солнца зависят освещенность и температура; Луна, создавая своим притяжением приливы и отливы, дважды в сутки движет воды морей и океанов, затопляя то более узкую, то более широкую прибрежную полосу, и свет ее разгоняет ночную тьму, заставляя меркнуть блеск звезд. Солнечные лучи падают то более, то менее отвесно на какую-то часть поверхности Земли, обращаемой вокруг Солнца, и (по крайней мере в

умеренном поясе) весну сменяет лето, лето — осень, а осень — зима. Живые существа несомненно не могут не воспринимать тем или иным образом перемены в окружающей среде.

В простейшем случае животное или растение лишь реагирует на поступающие из внешней среды и регулярно повторяющиеся сигналы. Если не будет сигналов, не появится и реакция. Это — так называемые *экзогенные (внешние) ритмы*, для осуществления которых не требуется особого внутреннего механизма. К числу внешних ритмов в известной степени принадлежат, например, «птичьи часы». На рассвете птицы начинают петь в определенной последовательности, вид за видом, а на закате умолкают в обратном порядке. Если небо на рассвете внезапно затянется тучами (яркость его изменится), то птичье пение в той же самой последовательности раздастся дважды. Таким образом, утренние

«птичьи часы» зависят в значительной степени от освещенности.

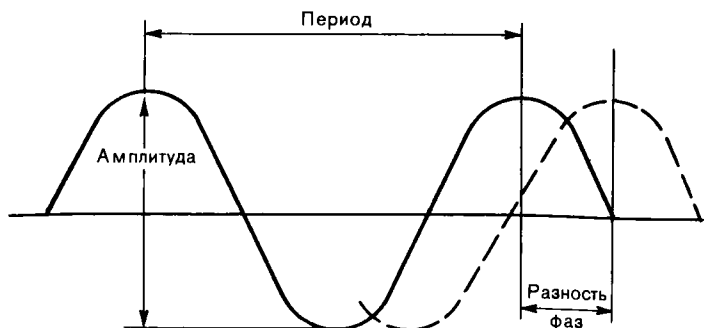
На другом конце шкалы биоритмов находятся *эндогенные (внутренние) ритмы*, то есть такие ритмы, периодичность которых не зависит от внешних сигналов. К числу процессов, проявляющих внутренние ритмы, среди прочих относятся биение сердца, периодические колебания электрического потенциала коры больших полушарий и т. д. Повторяемость явлений в этих случаях устанавливают исключительно внутренние механизмы.

У всех исследуемых животных и растений может наблюдаться, кроме того, сочетание внешнего и внутреннего ритмов, возникающее под действием периодически повторяющихся внешних сигналов и не исчезающее после прекращения их действия. Такой ритм способен подстроиться к внешним условиям. Как мы увидим, для ориентации в пространстве и по временам года безусловно желательно, чтобы животное не только различало выделенные моменты времени (рассвет или заход солнца), но и ощущало ход времени. Во многих случаях важно, чтобы животное или растение заранее узнавало об изменении окружающих условий. Например, если выбравшаяся из песка

диатомовая водоросль или вылезший из укрытия краб не почувствуют приближения прилива, то они легко могут погибнуть в прибывающей воде. Перелетные птицы попали бы в беду, если бы вздумали отправляться в путь только с наступлением холодного времени. Но бывает и так, что живой организм — в силу своего образа жизни — не может ощутить внешний сигнал. Например, спящие в пещерах днем летучие мыши не могли бы постоянно выглядывать наружу, всматриваясь, не наступил ли уже вечер, а под землю эта информация не поступает.

В нашей книге речь пойдет в первую очередь о *внешне-внутренних ритмах*. Они всегда следуют циклическим изменениям какого-либо внешнего фактора, но сохраняются после прекращения его изменений, и в то же время их период весьма устойчив к внешним воздействиям (повышению или понижению температуры, ядам и т. д.). Прежде чем мы подробно познакомимся со свойствами биологических ритмов и их практическим использованием, рассмотрим вкратце основные понятия, необходимые для их понимания.

Под *ритмом* мы имеем в виду цепь из повторяющихся в определенной последовательности событий, в которой для однократного проигрывания всех событий, то есть для про-



Между произвольно выбранными точками двух ритмов, например между точками максимумов, существует разность фаз.

хождение одного цикла, всегда необходимо одно и то же время. Таковы, например, однократный обход стрелки вокруг циферблата, смена времен года и т. д. Примерами ритмических явлений могут быть также любые колебания, периодические или циклические изменения, проза с повторами и т. д.

*Периодом* называется продолжительность одного цикла, то есть длина промежутка времени до первого повтора. Число циклов, совершающихся в единицу времени, называется *частотой* ритмов. Понятие частоты обычно используется лишь для ритмов с коротким периодом.

Под *амплитудой* мы понимаем размах колебаний между двумя предельными значениями ритмически изменяющейся величины. В случае движения часовых стрелок определить амплитуду не представляется возможным, но, например,

установить размах колебаний между максимальной и минимальной температурой за сутки на протяжении года вполне реально.

Термин *фаза* относится к любой отдельно выделенной части цикла, например к начальному периоду цикла, тогда это будет «начальная фаза». Этим термином пользуются, описывая связь одного ритма с другим или несколькими ритмами. Например, пик активности грызунов совпадает по фазе с темным периодом цикла свет — темнота. Если два выделенных отрезка времени не совпадают, то вводится термин *разность по фазе*, выраженная либо в долях периода, либо в градусах. В последнем случае весь цикл соответствует полному углу в  $360^\circ$ . Таким образом, разность по фазе между периодом активности грызунов и светлым периодом суток составляет  $180^\circ$ , или 12 часов. *Опережение* или *отставание*



по фазе означает, что событие произошло раньше или позже ожидаемого срока.

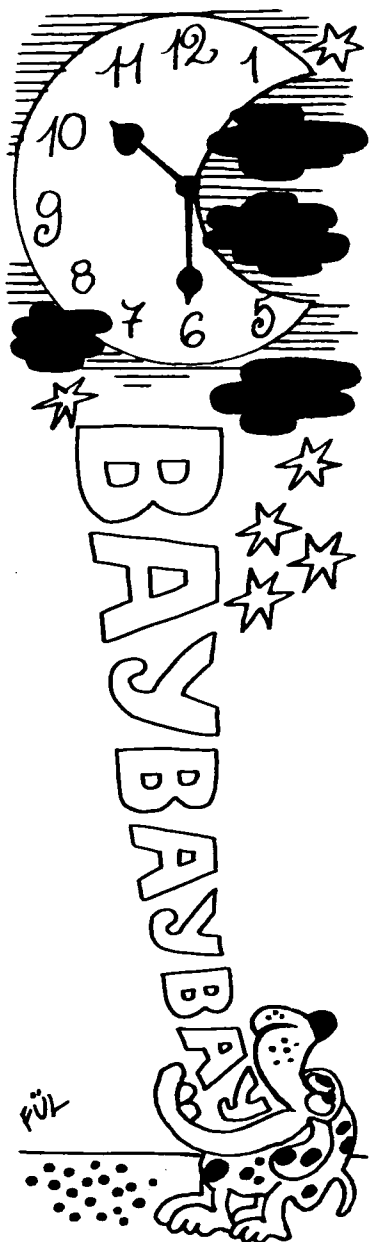
*Биологические часы* — это механизм, который задает биологические ритмы. Относительно природы биологических часов существуют два представления. Биологические часы «с внешним заводом», подобно солнечным часам, только передают получаемые извне периодические сигналы; часы же «с внутренним заводом» действуют на основе своего внутреннего цикла, внешние раздражители только задают точную периодичность и фазу.

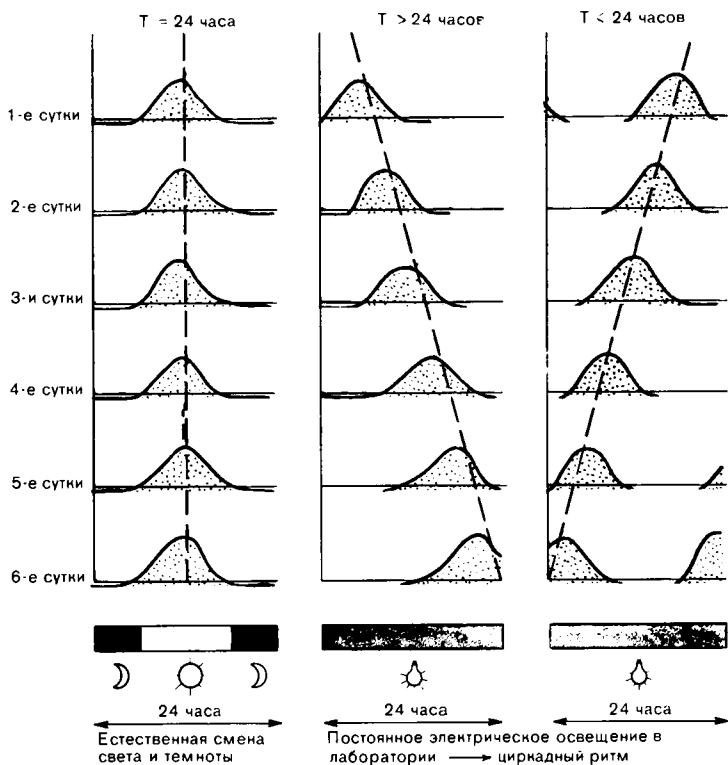
Если речь идет о биологических часах «с внутренним заводом», то всегда есть *синхронизирующие*, или *устанавливающие «правильное» время, факторы*, которые позволяют нам сверять ход часов по какому-нибудь внешнему циклу, то есть проверять фазу по каким-то внешним периодическим процессам. Устанавливать «рассогласованность» хода необходимо, потому что мы воспринимаем непосредственно только «часовые стрелки» — биологические ритмы, а механизм часов остается скрытым от нас. Существующая ныне служба единого времени не обеспечивает точную синхронизацию всех часов: при определенных обстоятельствах стрелки могут отставать или, наоборот, уходить вперед.

В процессе научных исследований часто используется искусственное освещение. Чередование светлых и темных периодов обычно описывается параметром СТ  $a:b$ , где СТ — начальные буквы слов свет — темнота, а  $a$  и  $b$  — соответственно продолжительность в часах светлого периода (дня) и темного периода (ночи). В этих обозначениях СС соответствует круглосуточному освещению, а ТТ — постоянному пребыванию в темноте.

В ритмах, наблюдаемых у живых организмов, синхронизирующие их факторы можно разделить на несколько групп по длине периода. Наиболее распространены *суточные ритмы* с 24-часовым периодом. Обитателям прибрежной полосы моря важно учитывать *приливные ритмы*, синхронизируемые следующими один за другим с интервалом в 12,4 часа приливами. *Лунно-суточные* и *лунно-месячные* циклы связаны с ритмом восходов Луны (24,8 часа) или смены ее фаз (29,5 суток). Наконец, нередки явления, повторяющиеся ежегодно, то есть с периодом, равным году; это *годовые циклы*.

Эти ритмы, вообще говоря, характерны тем, что после искусственного выключения синхронизирующего фактора, то есть при постоянных условиях, они сохраняются в течение более или менее продол-





После прекращения изменений синхронизирующего фактора период биологических ритмов будет длиннее или короче 24 часов. Такие ритмы называются циркадными.

жительного времени. Однако периоды таких *свободнотекущих ритмов*, как правило, все же несколько отличаются от исходных значений, поэтому они получили название *цир-*

*кадных* (от лат. *сiса* – прибли- зительный). Так, например, различают циркадные, цирка- приливные, циркалунные и циркагодичные ритмы.



# Суточные ритмы

Среди биологических ритмов, имеющих самые различные периоды, наиболее известны суточные ритмы. Причина их столь широкой известности состоит отчасти в том, что они наиболее распространены (достаточно сказать, что суточные ритмы наблюдаются почти у всех живых организмов), а отчасти в том, что наблюдать менее продолжительные явления проще, чем длящиеся месяц или год.

## Движения растений

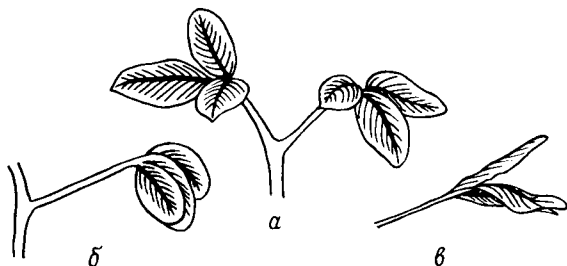
Отправляясь в азиатские походы, Александр Македонский взял с собой ученых – историков и естествоиспытателей. Один из них по имени Андро-тений обратил внимание на ритмическое движение листьев рожкового дерева. По свидетельству Андротения, листья этого растения ночью утомленно повисали, а утром снова поднимались. Андро-тений подробно описал свои наблюдения в дневнике, но они дол-

оставались преданными забвению.

Лишь более чем через 2000 лет после походов Александра Македонского французский астроном XVIII века де Мэран установил, что такие же движения совершает содержащаяся в темном помещении мимоза – в абсолютной темноте она днем поднимает листья.

Ныне уже очень многое известно о механизме движения листьев, об органах, заведующих движением, неясным остается лишь, как растения узнают время.

Разумеется, движение листьев появилось в процессе филогенетического развития отнюдь не на радость ботаникам: оно регулирует теплоотдачу и испарение растения. Двигательная система листа расположена у его черешка, где сверху и снизу находятся специальные группы клеток, называемые пульвиллами, или листовыми подушечками. В мембранах клеток, образующих подушечку, находится ме-



Движения листьев у донника желтого (*Melilotus officinalis*): положение листьев днем (*a*) и ночью (*б, в*) (вид сбоку и сверху).

ханизм, который по сигналу биологических часов в определенное время пропускает внутрь клеток ионы калия. С рассветом ионы калия начинают скапливаться в нижней подушечке. Как только концентрация достигает предела, при котором внешнее осмотическое давление становится равным внутреннему осмотическому давлению, вода поступает в клетки нижней подушечки, они набухают, и лист расправляется. Вечером ионы калия покидают нижнюю листовую подушечку и скапливаются в верхней подушечке: листовая пластинка складывается.

Движение листьев происходит и в постоянной темноте. Фазы движения можно произвольно изменять с помощью искусственного освещения. При облучении растения узким пучком света желаемого эффекта (смены фаз движения) удастся достигнуть лишь в том случае, если луч света падает на листовую подушечку. Сле-

довательно, часы, управляющие движением листа, и светочувствительное устройство находятся в его подушечках.

Самостоятельность этого органа доказывается тем, что если какой-нибудь лист освещать в ритме, противоположном ритму освещения остальных листьев на растении, то выделенный лист развертывается, когда остальные листья складываются, и «засыпает», когда его «собратья» снова принимают горизонтальное положение. Тем не менее определенная связь между частями растения существует, и наш лист с навязанными ему «причудами» спустя какое-то время либо снова начнет двигаться «в такт» с остальными листьями, либо скрутится и совсем прекратит движения.

Срезанный и помещенный в постоянную темноту лист (разумеется, поставленный в воду) продолжает ритмичные движения иногда на протяжении месяца. Необходимость

синхронизации с другими частями растения в этом случае отпадает. Циклические движения черешка не прекращаются и в том случае, если мы удалим листовую пластинку, только интенсивность движений заметно ослабевает.

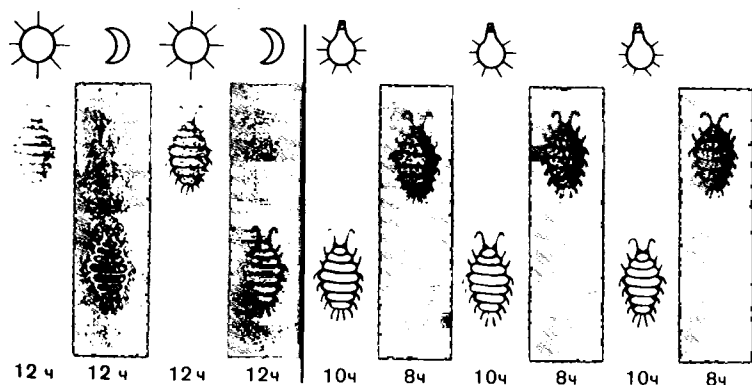
### Важнейший из факторов — свет

Свет является наиболее сильным синхронизирующим фактором не только для суточных движений листьев, но и для других биологических ритмов. Искусственно изменяя фазу внешнего цикла свет — темнота, можно произвольно сдвигать у подопытных растений и животных ритмы по фазе, то есть добиваться наступления определенной части цикла в любое заданное время суток. Удастся изменять и пе-

риод, но лишь в достаточно жестких пределах.

*Пределы синхронизации* (затягивания) ритма изменяются от вида к виду и даже от особи к особи. Мыши и хомяки не могут приспособиться к суткам продолжительностью менее 21 часа или более 26 часов, но при внешнем цикле с периодом около 24 часов ведут активный образ жизни. Ритм с периодом около 24 часов сохраняется и при отсутствии синхронизирующих факторов.

Существуют животные и растения с допустимыми пределами синхронизации соответственно 18 и 30 часов. Однако довольно часто случается, что предельно короткие или предельно длинные сутки сильно искажают естественную смену фаз цикла. Например, если равноногих раков *Ligia baudiniana* содержать в есте-



Ритм изменения пигментации у равноногого рака (*Ligia baudiniana*) при отношении свет — темнота 10:8. Максимальная пигментация смещается со дня на ночь.

ственных условиях так, чтобы 10 часов они находились на свету и 8 часов в темноте, то наряду с особями, у которых максимальная пигментация (более темная окраска) приходится на день, появятся особи с максимальной пигментацией, приходящейся на ночь.

Способность внешнего светового цикла к синхронизации биоритма зависит от интенсивности света. Более сильный свет позволяет изменять период цикла в более широких пределах, более слабое освещение может изменить период лишь на малую долю от 24 часов.

Биологический ритм удается синхронизировать, чередуя не только свет и темноту, но и промежутки времени с различной освещенностью. Во многих случаях достаточно, чтобы степень освещенности отличалась всего на 10%. Такого рода синхронизацию легче производить над растениями и животными, обитающими в арктических условиях. Дело в том, что в летнее время солнце не заходит днем в широтах выше 70-й параллели, хотя дневная освещенность и температура отличаются от ночной. Ясно, что эксперименты по синхронизации чередованием двух периодов неодинаковой освещенности удобнее производить над организмами, процессы жизнедеятельности которых поддаются регулировке

меньшими разностями в освещенности. По мере продвижения к полюсу различие между «дневной» и «ночной» освещенностью уменьшается настолько, что световой цикл утрачивает способность приводить к синхронизации, и в высоких широтах наблюдается рассогласование ритмов.

Для приспособления к естественно длинным циклам освещенности требуется несколько суток, в течение которых возможны переходные циклы. Затем, если продолжительность искусственных суток выбрана в допустимых пределах, организм начинает следовать новому периоду без заметных трудностей.

Однако из опытов с плодовой мушкой (*Drosophila melanogaster*) выяснилось, что организм все же мало чувствителен к длине периода, так как у мушек, живших в условиях искусственного освещения (продолжительность светлой части цикла составляла соответственно 21, 24 и 27 часов), примерно 24-часовой цикл сохранился и у животных, входивших в первую и третью группы.

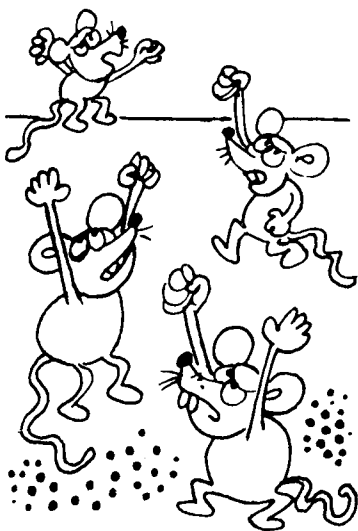
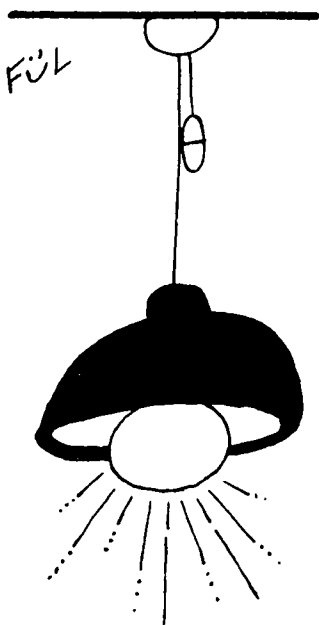
### **Приспособление ритмов к среде: ритм, задающий фазу**

Каким образом ритмы согласуются с циклом внешнего освещения?

Если проследить в темноте

или в более удобной для наблюдения полутьме за каким-нибудь животным, активным в ночное время, например за крысой или мышью, то окажется, что почти все 24 часа животное сохраняет активность: шевелит усами, исследует пищу, умывается, встает на задние лапы — хотя в его деятельности и прослеживается циркадный ритм. Но стоит в то или иное определенное время суток начать систематически включать на один час свет, как суточный ритм изменится. Создается впечатление, что животное стремится использовать короткий светлый период как своего рода временную вежу. Если свет пришелся на начало активности, то на следующие сутки животное «встает» позже: вести тайный образ жизни удобнее не при свете. Наоборот, если включение света приходится на конец «рабочего дня», когда животное отправляется на покой, то в следующий раз оно примется за работу пораньше, чтобы успеть спрятаться в нору к тому моменту, когда ожидается включение света.

Разумеется, такое поведение не является результатом сознательно принятого решения. Речь идет просто о механизме приспособления к внешней периодичности, которым наделены все живые существа, и о том, что свет способен сдвигать биологические ритмы

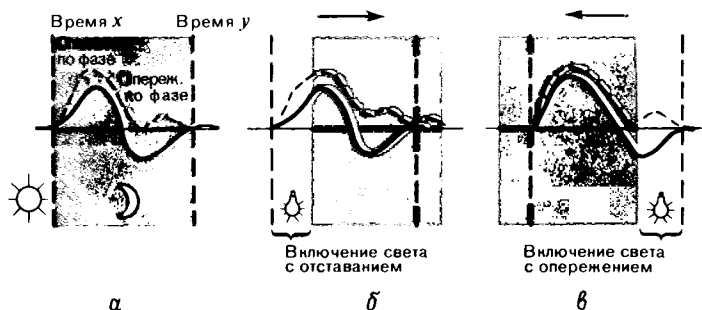


по фазе. Этот механизм сам обладает циклическим действием, тесно связанным с другим ритмом: освещение, включаемое в одну часть суток, приводит к опережению по фазе, в другую часть — к отставанию по фазе, а во все остальное время не изменяет фазу биологических ритмов.

*Кривая фазового отклика* показывает, какой сдвиг фазы вызовет у животного краткое одиночное включение света в определенное время суток, то есть в определенной фазе ритма. Установление новой фазы обычно происходит после нескольких переходных циклов; на представленных графиках эти промежуточные циклы опущены и показано только конечное состояние. Продолжительность освещения может

составлять от часа до нескольких минут или секунд. Более того, на цикле выхода из куколки взрослой плодовой мушки сказывается даже освещение в течение  $1/2000$  секунды. Разумеется, при нормальных условиях такая регуляция фазы ритма кратковременным освещением не используется. Но, зная кривую фазового отклика, нетрудно понять, каким образом биологические ритмы приспособляются к внешнему циклу.

Вернемся еще раз к ночным грызунам. Их активность и период ритма, задающего фазу, в основном приходятся на ночь. Если мы введем затемнение с опозданием на 6 часов, животное начнет активно двигаться при свете. Но именно свет приведет к сдвигу фазы



Нормальная кривая фазового отклика (сплошная линия) у животных, ведущих ночной образ жизни, и кривая активности (прерывистая линия). На рисунке показаны периоды отставания и опережения по фазе в темноте. Если животное осветить в период отставания по фазе (*a*), то обе кривые сдвинутся вправо (*б*). Если же животное осветить в период опережения по фазе (включить свет раньше), то обе кривые сдвинутся влево (*в*). Такой механизм позволяет животному приспособляться к различным условиям освещения и всегда оставаться активным в темноте.

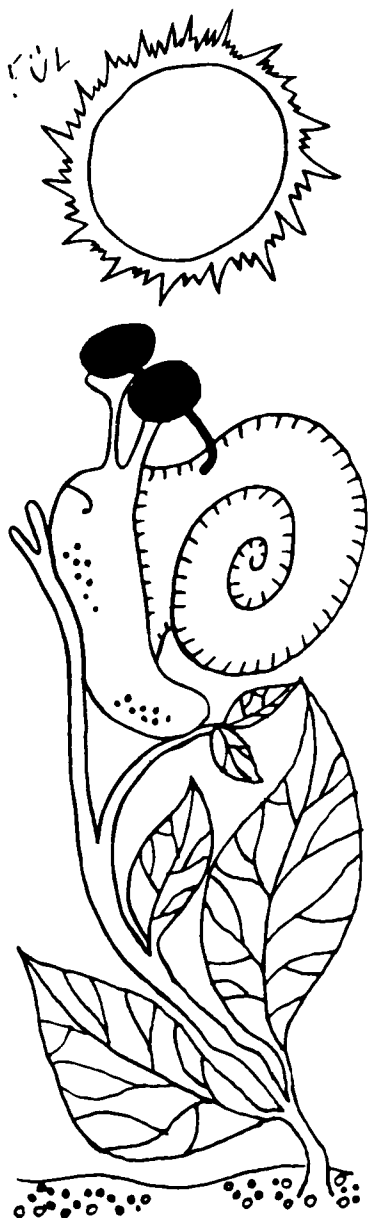
ритма назад, и на следующие сутки грызун позже примется за работу. Так как между ритмом активности и ритмом, регулирующим фазу, должна существовать определенная связь, сдвиг фазы сохраняется до тех и только до тех пор, пока не устанавливается первоначальное состояние фаз биоритма и освещения. Если фазу светового цикла сдвинуть на 6 часов вперед, то будут обратные изменения.

Для всех изученных видов построенные кривые оказались сходными. Различие проявлялось лишь в величине периодов опережения и отставания по фазе.

Механизм влияния на сдвиг фаз всех остальных синхронизирующих факторов (например, приливов и отливов) можно описать с помощью аналогичных кривых фазового отклика. Где именно находится и как действует устройство, задающее фазу цикла, пока неизвестно.

### Светочувствительность

Растения воспринимают свет прежде всего прозрачными клетками, составляющими кожу листьев. В восприятии синхронизирующего воздействия света, по всей вероятности, принимает участие не хлорофилл, а пигменты, называемые фитохромами. В пользу такого предположения гово-



рит тот факт, что свет с большей длиной волны, на который реагируют фитохромы, оказывает более сильное влияние на сдвиг фаз, чем свет с более короткой длиной волны. Не исключено, однако, что не у всех видов растений фитохром играет роль «зрительного пигмента».

По-видимому, у растений одни пигменты поглощают свет при фотосинтезе, другие обеспечивают ход биологических часов. Сам светочувствительный пигмент, скорее всего, не является составной частью часов. Он лишь каким-то образом участвует в восприятии света.

Многие животные имеют специальные органы зрения. Однако в большинстве случаев головной мозг животного способен воспринимать световое раздражение не через глаз, а непосредственно. Поразмыслив, мы поймем, что эта особенность животных не столь удивительна: в процессе филогенетического развития сначала возникла способность воспринимать свет вообще и лишь на более поздней стадии появился глаз, способный воспринимать изображение.

Улитки, раки, некоторые насекомые, даже если их лишить возможности видеть, не утрачивают способности адаптироваться к циклу искусственного освещения. Но воспринимать свет непосредственно мо-

жет не только мозг беспозвоночных.

При не слишком ярком искусственном освещении поведение домашних воробьев со светонепроницаемыми колпачками на глазах не подчиняется внешнему ритму. Но если на голове у птицы выщипать перья, наступит синхронизация. Когда же перья отрастут, синхронизация с внешним ритмом нарушится. Ощиплем вновь перья на голове у воробья. Свет, проходящий через голую кожу, снова вызовет подстройку по фазе. Сделаем теперь воробью подкожную инъекцию туши на свободном от перьев участке головы. После такого вмешательства согласованность внешнего и внутреннего ритмов вновь нарушается.

У представителей всех групп позвоночных головной мозг обладает способностью воспринимать свет. Единственное исключение составляют млекопитающие.

### **Прекращение синхронизирующего влияния**

До сих пор мы говорили главным образом об искусственных циклах свет-темнота. Рассмотрим теперь, что происходит в том случае, когда внешний ритм исчезает и устанавливается либо *постоянный свет*, либо *постоян-*



ная темнота. В обоих случаях в течение более или менее продолжительного времени биологический ритм остается, но его период обычно отклоняется от 24 часов. Разумеется, воздействуя на организм другими внешними факторами, этот 24-часовой ритм можно восстановить. В помещениях, где проводятся подобные опыты, необходимо поддерживать постоянную температуру и влажность, не обойтись и без звукоизоляции. По данным некоторых исследователей, организмы, попавшие в такие условия, черпают обширную информацию о ходе времени из воспринимаемых ими временных изменений магнитного и электрического поля, а также различного рода излучений. Полностью изолировать подопытных животных и растения от внешних воздействий в большинстве случаев невозможно либо слишком сложно, поэтому слабые сигналы, поступающие извне, как правило, не принимаются исследователями во внимание.

При постоянных внешних условиях у животных и растений наблюдаются правильные ритмические циклы, амплитуда и период которых варьируют в зависимости от вида организма и ритма. Эти колебания сохраняются от нескольких дней до нескольких месяцев в зависимости от температуры, интенсивности постоян-

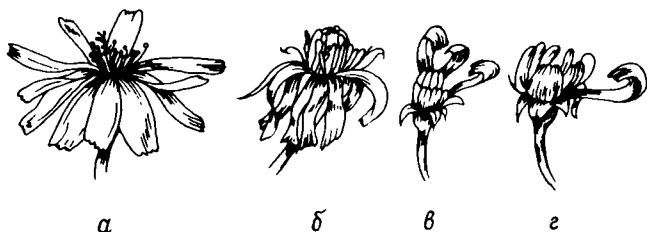
ного освещения и многих других факторов.

Весьма стойким оказывается, например, циркадный ритм различных грызунов, особенно у тех, которые впадают в зимнюю спячку, например у сонной полчки (*Glis glis*). Этот маленький зверек так глубоко уходит «с головой под одеяло», что не имеет ни малейшего представления обо всем происходящем во внешнем мире: его циклы перестают зависеть от внешнего ритма.

В большинстве случаев в отсутствие синхронизации с внешним ритмом свободно текущие ритмы рано или поздно затухают. Происходит это по нескольким причинам.

Например, у растений, постоянно находящихся в темноте, прекращается фотосинтез, что может привести к нарушению хода биологических часов из-за уменьшения подачи энергии. Правда, от этих часов мы видим только «стрелки», и с первого взгляда трудно установить, остановились ли сами часы (их внутренний механизм) или только стрелки.

У многоклеточных организмов и в популяциях одноклеточных из-за десинхронизации циклов отдельных клеток может исчезнуть видимый ритм. Среди многоклеточных организмов этот тип нарушения ритма встречается в первую очередь у растений. У животных же за поддержанием



Нарушение цикла открывания–закрывания у цветков соцветия цикория обыкновенного (*Cichorium intybus*) при постоянном освещении вследствие десинхронизации цикла одного из цветков. Нормальное соцветие (а), через 16 суток непрерывного освещения (б), через 22 суток (в), через 28 суток (г).

синхронизации следят, хотя и не всегда успешно, нервная и гормональная системы.

В общем случае можно утверждать, что для большинства растений и животных постоянная темнота или мягкий сумрак благоприятнее сказываются на сохранении ритмов, чем яркий свет. Если при прочих неизменных условиях какой-нибудь периодический процесс приостанавливается, причиной тому может быть либо остановка часов, либо прекращение связи с продолжающими идти часами. И в том, и в другом случае ритм в большинстве случаев удается *запустить* снова. Для этого можно воспользоваться коротким импульсом света, сменить постоянную темноту на постоянный свет или, наоборот, повысить или понизить температуру. По существу, повторный запуск ничем не отличается от первого. Те же воздействия позволяют запустить

биологические ритмы в организмах, выросших в неизменяющихся условиях.

### Правило Ашоффа

У сухопутных позвоночных лучше всего изучен периодический процесс, состоящий в правильном чередовании периодов активности и покоя. Наблюдать его нетрудно. К тому же наблюдения можно вести с помощью приборов, не беспокоя животное. Ритм, о котором идет речь, связан с ритмом сон–бодрствование, но не полностью совпадает с последним.

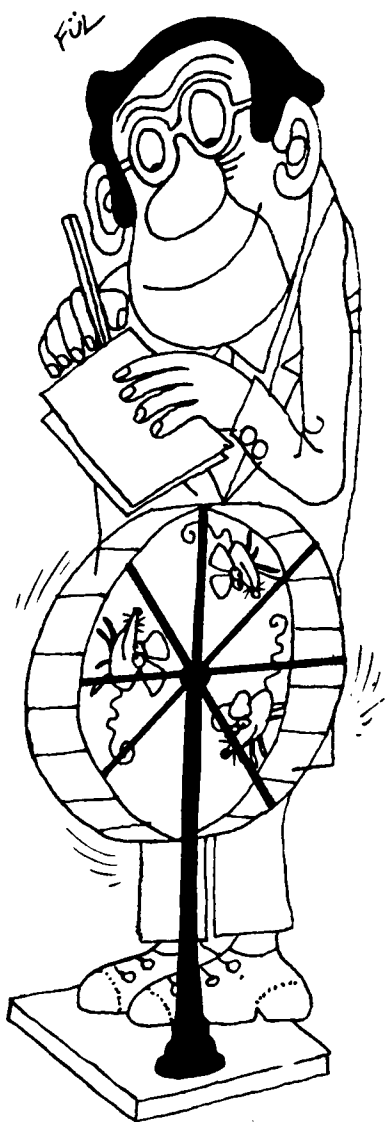
Поместим, например, мелких грызунов в изолированные клетки со всеми удобствами, в каждой из которых помимо двухнедельного запаса пищи и воды имеется беличье колесо. В него животное может влезть, когда ему захочется немного побегать, но принуждать гры-

зуна к «разминке» ни в коем случае не следует.

С беличьей клеткой мы обычно связываем представление о муках животного. Перед нашим мысленным взором предстает изнуренная, до смерти уставшая белка, которая никак не может остановиться и принуждена продолжать нескончаемый бег. Вопреки этому довольно распространенному представлению животные охотно бегают в колесе; к тому же на свободе они двигаются гораздо больше.

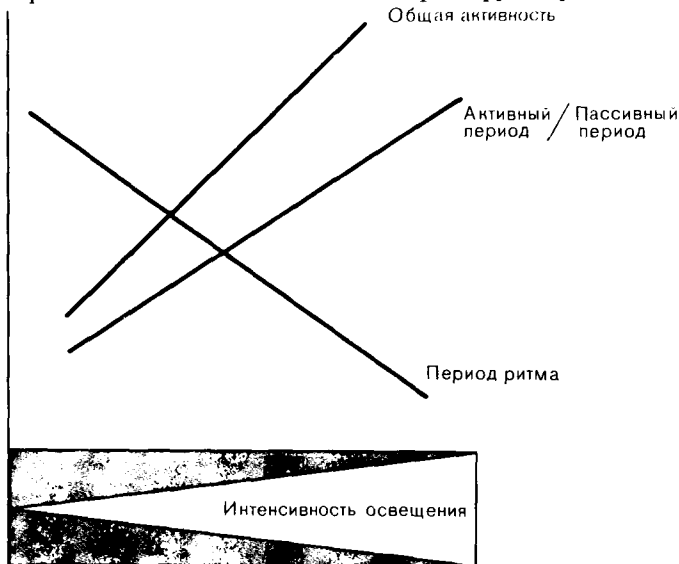
Двигательную активность такого рода легко регистрировать, если каждый оборот колеса записать на бумажной ленте самописца. Клетки с мышами ставятся в специальное помещение, в котором поддерживается постоянная температура, и через определенные промежутки времени включается и выключается свет. Исследователю необходимо лишь заглядывать в лабораторию раз в неделю или в десять дней, чтобы пополнить запас питьевой воды и засыпать корм в кормушки.

Между интенсивностью постоянного освещения и длительностью периода активности животных была установлена интересная зависимость. Период активности ночных животных увеличивается с увеличением интенсивности освещения, а дневных — сокращается. Но с увеличением интенсив-



ности освещения изменяется не только длина периода. От интенсивности света зависит общая активность животного, отношение продолжительностей активной фазы и фазы покоя. Это и есть так называемое правило Ашоффа<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Количество исключений из правила Ашоффа почти равно количеству фактов, его подтверждающих. Мы предлагаем иную циркадную схему, согласно которой период циркадного ритма определяется суммой задержек и опережений ритма по фазе, вызванных постоянными условиями. — Здесь и далее примечания редактора.



Формирование ритма двигательной активности зябликов при различной интенсивности постоянного освещения.

## Второстепенные синхронизирующие факторы

У животных и растений, обитающих вне приливо-отливной зоны, самым важным сигналом суточных ритмов является свет. Видимое движение Солнца по небосводу приводит не только к сменам дня и ночи, но и к периодическим изменениям температуры — факторам, играющим основную роль в приспособлении организмов к окружающей среде.

На изменение температуры особенно сильно реагируют те организмы, у которых недостаточно развита терморегуляция.

При круглосуточном по-

стоянном освещении движение листьев фасоли синхронизируется с периодическими колебаниями температуры от 25 до 30°C. Листья приподнимаются в более теплое время суток и опускаются в более холодное. Еще чувствительнее движение лепестков каланхоэ (*Kalanchoe*): достаточно температуре снизиться на 1°C, как движение начинает замедляться.

Столь же высокую чувствительность мы обнаруживаем и у животных. Двигательная активность таракана *Leucophaea maderae* синхронизируется с изменениями температуры в 5°C, ящериц — в 1°C, слизней — всего в 0,1°C. Возможно, что тепловые сигналы воздействуют на биологические часы не прямо, а через нервные окончания в коже.

Пределы температурной синхронизации выглядят примерно так же, как пределы синхронизации светом. Навязать организму циклы короче 16 и длиннее 30 часов с помощью периодического повышения и понижения температуры оказывается невозможным. Величина отклонения от 24-часового цикла зависит от разности температур в фазе потепления и похолодания, то есть от амплитуды синхронизирующего ритма.

Приспособление к температурному циклу происходит по такому же механизму, как и приспособление к условиям ос-

вещенности. Короткие импульсы тепла или холода в разное время суток вызывают различное отставание или опережение по фазе. И в этом случае можно построить кривую фазового отклика, которая по виду совпадает с кривой фазового отклика, построенной для коротких импульсов света.

Помимо света и температуры на биологические ритмы влияют и многие другие факторы окружающей среды. Однако их воздействие в целом менее эффективно. Они лишь дополняют более важные синхронизирующие факторы. К числу таких второстепенных факторов относятся, например, влажность воздуха, шум, общественные взаимосвязи и т. д. Для организмов, обитающих в приливно-отливной зоне, затопление берега и отступление воды являются гораздо более важным экологическим фактором, чем чередование темноты и света. Их двигательная активность приспособлена к колебаниям уровня моря: сигналы, связанные с приливами и отливами, имеют для них большее значение, хотя у многих обитателей прибрежной полосы можно обнаружить суточный ритм, синхронизированный с изменениями освещенности.

Совершенно особое место занимает такое социальное существо, как человек. Цивилизация настолько изменила сре-

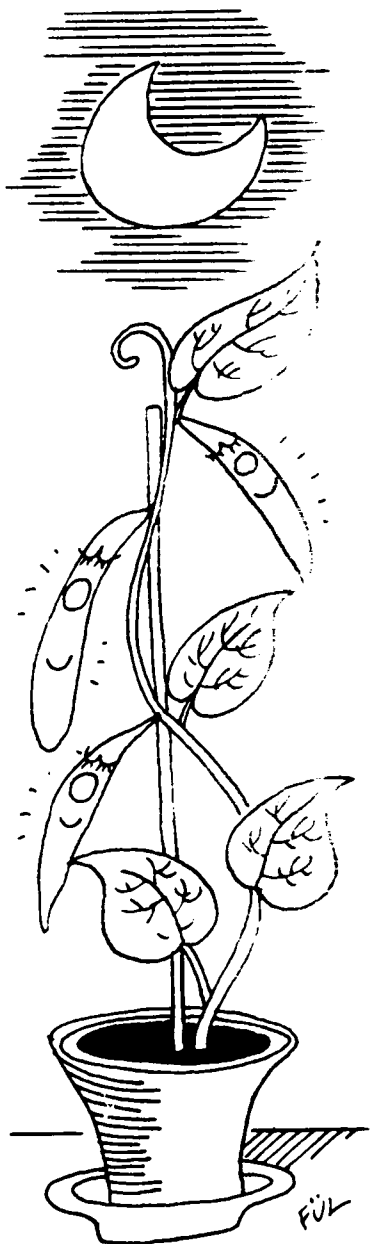
ду его обитания, что социальные связи превратились в синхронизирующие факторы первостепенного значения.

### **Химические основы устойчивости ритмов**

Биологические ритмы весьма чувствительны к изменению синхронизирующих факторов, но удивительно устойчивы по отношению к неперiodическим воздействиям, даже к ядам.

В протекании любого процесса в организме участвуют биохимические реакции. Давно известно, что механизм биологических часов в этом смысле не является исключением. Какими только веществами ни пытались воздействовать на биологические ритмы: и ингибиторами, замедляющими синтез белка, и метаболитами, регулирующими обмен веществ, и веществами, тормозящими реакции, в которых катализаторами выступают ферменты, и стимуляторами роста и многими другими. Но, за редким исключением, исследователям не удалось ни изменить период цикла, ни добиться сдвига фаз.

Во всяком случае, круг активно действующих веществ достаточно узок, известно лишь одно химическое соединение, длительное применение которого всегда вызывает увеличение периода. Это тяжелая



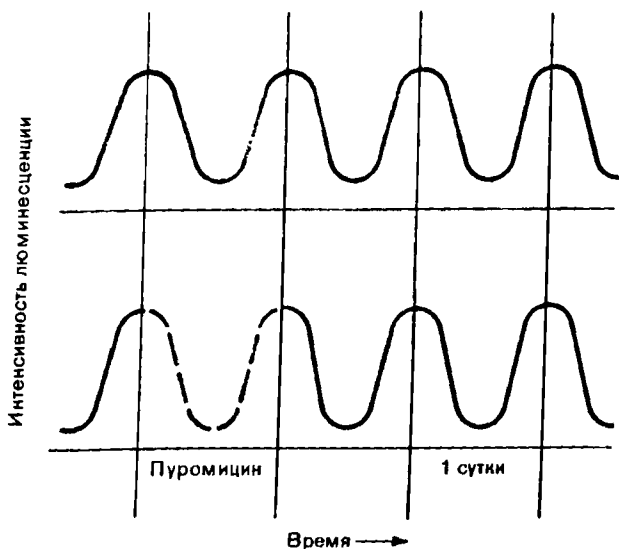
вода ( $D_2O$ ). Остальные вещества, точнее ионы, обладают кратковременным действием. Вызываемое ими ускорение или замедление биологических ритмов напоминает кривые фазового отклика на световой или температурный импульс. В случае продолжительного применения у одних организмов они вызывают в определенных пределах замедление ритмов, на других их действие никак не сказывается. Но все равно речь идет лишь об очень узкой группе веществ.

Одноклеточная жгутиковая водоросль *Gonyaulax* в процессе своей жизнедеятельности периодически светится (это

явление называется биолюминесценцией). Если на нее подействовать веществом, замедляющим синтез белка (пурамицином), свечение прекратится, но после его удаления свечение возобновится, как если бы биологические часы шли все время, не останавливаясь. По-видимому, пурамицин остановил не часовой механизм, а только «стрелки».

Аналогичное действие оказывают и другие химические вещества, а также сильное охлаждение<sup>1</sup>. И тут опять не-

<sup>1</sup> Охлаждение приводит к остановке ритма, но не обязательно на той фазе, во время которой оно начато.



Люминесценция жгутиковой водоросли *Gonyaulax* прекращается после воздействия на нее пурамицином. После удаления пурамицина ритм люминесценции восстанавливается, даже если синтез белка был полностью подавлен.

вольно напрашивается сравнение с часами: глядя на стрелки, трудно понять, как действует внутренний механизм часов. В то же время все наблюдения над работой тех или иных биологических часов подтверждают одно — они потребляют довольно мало энергии.

Была подробно изучена способность листьев к ритмическим движениям. Результаты исследований позволили обосновать одну из наиболее многообещающих моделей биологических часов — так называемую *мембранную гипотезу* (см. стр. 66). Ситуацию упрощало то, что механизм движения листьев хорошо известен. Срезанные листья фасоли или каланхоэ помещали в воду и держали при постоянных условиях. Как мы уже упоминали, листовая пластинка при этом сохраняет способность складываться «на сон грядущий». Подмешивая к воде те или иные вещества, исследователям нетрудно было установить характер их действия.

Примесь тяжелой воды приводила к увеличению периода колебаний. Точное объяснение этого явления пока неизвестно. Существует предположение, что изменение ритма вызвано стабилизирующей ролью дейтерия. Более тяжелый изотоп водорода, замещающий атомы обычного (легкого) водорода, придает структуре

белков и, следовательно, мембране большую стабильность. Аналогичные соображения были высказаны и в связи с другими биологическими ритмами.

Проводимость мембраны изменяет антибиотик валиномицин. Это вещество уничтожает бактерии, обеспечивая свободное движение ионов калия через стенку их клеток. Действие валиномицина можно объяснить изменением калиевого тока. Это интересно потому, что, как уже упоминалось, разбухание подушечек и расправление листьев связано с появлением в избытке ионов калия. Мембранная гипотеза, о которой говорилось выше, предложила механизм, регулирующий движение ионов калия, и отождествила его с биологическими часами. Эта гипотеза связывает с каждым периодическим явлением некоторое распределение токов ионов как процесса, определяющего в конечном счете все.

### **Нечувствительность к температуре окружающей среды**

Подобно тому как биологические ритмы не чувствительны к ядам и другим химическим веществам, частота их колебаний остается неизменной при продолжительном повышении или понижении температуры окружающей среды. Наоборот, кратковременное охлаж-



дение или нагревание в зависимости от того, в какой момент оно происходит, вызывает сдвиг фазы вперед или назад.

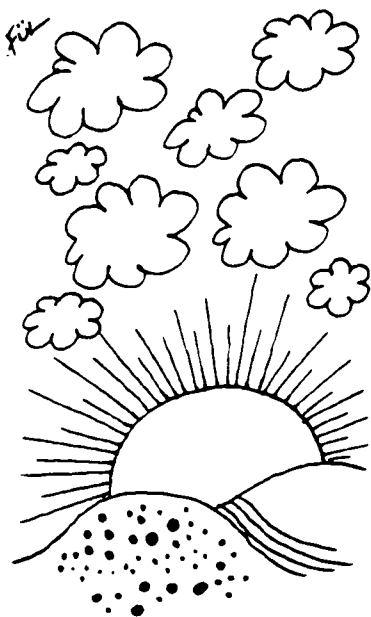
Скорости химических и биохимических реакций с повышением температуры возрастают, как правило, экспоненциально. Величину, показывающую, во сколько раз возрастает скорость реакции при повышении температуры на  $10^{\circ}\text{C}$ , принято обозначать  $Q_{10}$ . При нормальных условиях она составляет примерно 2–3, то есть при повышении температуры от  $10$  до  $20^{\circ}\text{C}$  скорость химической реакции возрастает примерно в три раза, а при повышении температуры до  $30^{\circ}\text{C}$  — в девять раз. Наоборот, на частоту биологических ритмов повышение температуры окружающей среды (разумеется, в определенных пределах) оказывает едва заметное влияние. Лишь в отдельных случаях повышение температуры приводит к удлинению периода. Величина  $Q_{10}$  для биологических процессов обычно составляет 0,9–1,1.

Устойчивость по отношению к периодическим внешним сигналам типа солнечных часов — один из наиболее весомых доводов современных исследователей, ломающих копья из-за теории, отводящей биологическим часам скромную роль передающего устройства. Приверженцы внутренних часов считают, что

либо датчиками ритма служат физические процессы (например, диффузия), для которых величина  $Q_{10}$  меньше единицы, либо нечувствительность к колебаниям температуры окружающей среды обусловлена последовательно протекающими химическими реакциями, по-разному откликающимися на температурные воздействия.

По существу, проблема возникла из-за того, что исследователи невольно наделили биологические часы характерными особенностями обычных наручных часов. Например, если стрелки наручных часов вращаются быстрее, чем надо, то это означает, что часы идут быстрее, то есть спешат. Но процессы, из которых складывается механизм биологических часов, носят качественно иной характер, и на период ритма влияет не только *скорость*, но и *продолжительность* протекания процессов. До тех пор, пока этот механизм не изучен подробнее, было бы преждевременно по изменямости или постоянству периода делать какие-либо выводы о скорости процессов, лежащих в его основе.

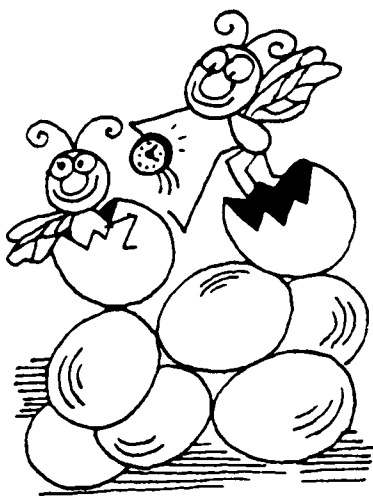
Не исключено, однако, что в ходе эволюции произошла тонкая адаптация глубинных процессов и что именно их согласованное действие обуславливает слабую зависимость периода от колебаний темпе-



ратуры окружающей среды. Это предположение подкрепляется следующим соображением: если бы согласованность процессов не давала особых преимуществ с точки зрения приспособляемости организма, она вряд ли была бы доведена до такого совершенства. В пользу этого соображения свидетельствуют многие данные. Постоянный уровень температуры все же отражается на периоде ритма. Например, движение листьев урда (*Phaseolus mungo*) обнаруживает циркадный ритм с периодом 24,6 часа при температуре 32°C и ритм с периодом 32 часа при 17°C. У другого тропического растения (*Cestrum nocturnum*) отмечен 24-часовой ритм при температуре 20°C и 31-часовой ритм при 14°C.

### **Биологические часы в роли «сторожа у ворот»**

Действие биологических часов проявляется не только в изменениях ритмов различных физиологических процессов. Адаптация может осуществляться и по отношению к однократным событиям или событиям, происходящим всего несколько раз на протяжении жизни организма. Регулирующее действие в подобных случаях состоит в том, что «ворота» открываются только в определенное время суток: то-



му или иному событию предоставлено совершенно определенное время. А вот произойдет ли оно при открытых «воротах», зависит от внутренних условий протекания процесса, того, насколько организм созрел для этого, и прочих факторов. Если соответствующее состояние достигается вскоре после истечения благоприятного периода (когда «ворота» уже закрыты), событие может произойти не раньше, чем «ворота» откроются в очередной раз. Пожалуй, лучшим примером, наглядно демонстрирующим биологические часы в роли «сторожа у ворот», служит выплод мушки *Drosophila*. В переводе с греческого это название означает «любящая росу». Плодовые мушки получили его потому, что при содержании в нормальных условиях взрослая особь выходит из куколки всегда в одно и то же время — на заре, когда выпадает роса и воздух влажен. Хитиновая оболочка едва вылупившегося насекомого, тонкая и мягкая, не может служить защитой от испарения. В сухом жарком воздухе плодовые мушки высохли и погибли бы.

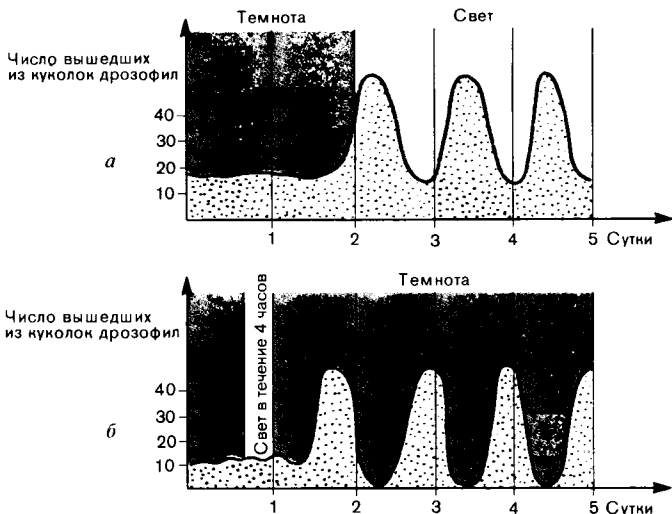
Ритм выплода плодовых мушек обладает такими же особенностями, как и остальные 24-часовые ритмы, с которыми мы успели познакомиться. Если куколки дрозофил хранить в полной темноте или в

условиях непрерывного освещения, то мушки будут выходить в случайные моменты времени. Если же культуру дрозофил, выращенную при искусственном освещении, поместить в полную темноту, то появится ритм. Изменение ритма весьма легко достигается другим способом. Если культуру, выращиваемую в полной темноте и беспорядочно выходящую из куколок, поместить на свет или подвергнуть однократному освещению, то этот неперIODический сигнал послужит толчком к запуску цикла.

Кладка яиц длится дня два. Взрослые дрозофилы начинают выходить из куколок после 17-дневного развития, но выплод может растянуться до 8 суток. Иначе говоря, развитие мушек происходит с различной скоростью. Но задержка зависит не только от скорости развития.

Выплод дрозофил происходит примерно часов шесть на рассвете, в остальные 18 часов он «запрещен». Особенно много мушек появляется на свет в начале каждого разрешенного периода, затем интенсивность выплода идет на убыль. Это означает, что, как только «ворота» открываются, сразу же вылетают мушки, полный цикл развития которых закончился в запретный период.

Свет — основной синхрони-



Выход из куколок плодовых мушек *Drosophila*, случайный по времени при их содержании в темноте, обретает ритмический характер, если культуру вынести на свет (а) или однократно (продолжительность импульса — 4 часа) осветить (б).

зирующий фактор для ритма выплота плодовых мушек (как и для большинства ритмов), хотя изменение температуры может приводить к сдвигу фазы.

Аналогичный «контрольно-пропускной» механизм регулирует деление клеток у одноклеточных и многоклеточных организмов. Это явление привлекло к себе внимание еще в середине прошлого века, но лишь в начале нашего века было установлено, что при постоянных условиях цикл сохраняется. Первые наблюдения производились над растениями. В различное время суток из верхушек побегов и корней брали срезы и подсчитывали

число клеток, находящихся в стадии деления. При постоянных условиях у подопытных растений наблюдались стойко сохраняющиеся ритмы деления.

Сходные опыты были проведены с грызунами. От уха животных в определенные часы брали по кусочку ткани и, изготовив срез, подсчитывали число делящихся клеток. Пик деления приходился на ночь, то есть на период активности у грызунов<sup>1</sup>.

Было исследовано и деление клеток у человека. Правда,

<sup>1</sup> Как правило, пик деления клеток приходится на время минимальной активности животного.

у добровольно вызвавшихся «жертв науки» в назначенное время брали не кусочек уха, а срез кожи с плеча. Такая «экзекуция» не только менее заметна, но и следы ее быстрее зарастали. Как показали наблюдения, максимум деления клеток у человека приходится на полдень и вечер.

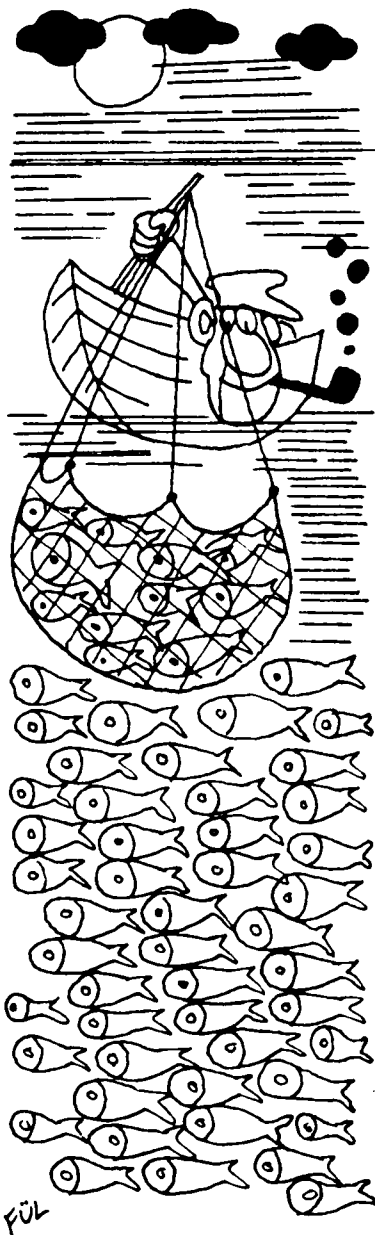
Хотя ученые никогда не испытывали недостатка ни в студентах-добровольцах, ни в грызунах, изучать деление клеток удобнее всего на одноклеточных. Процессы с многосуточными ритмами легко наблюдать на жгутиковых водорослях *Gonyaulax*. Изучение одного из таких ритмических явлений — деления клетки — облегчается тем, что клетки, образовавшиеся в результате деления, остаются слипшимися вместе и через полчаса после своего рождения. Подсчитывая пары клеток, мы можем судить о скорости деления этой одноклеточной водоросли. В культуре, выдерживаемой 12 часов на свету и 12 часов в темноте (СТ 12 : 12), 85% клеток претерпевают деление в течение пяти часов в сутки, охватывающих последние часы пребывания в темноте и первые часы пребывания на свету; при постоянном слабом освещении этот ритм сохраняется до 14 суток. Время жизни одного поколения *Gonyaulax* составляет около 4 суток — каждая клетка претерпевает

деление с интервалом в 4 суток. Состояния, годного для деления, клетки достигают в различное время, но делятся не сразу, а лишь после задержки, когда биологические часы разрешат процесс деления. Аналогичное явление наблюдается и у других одноклеточных растений и животных, в том числе у дрожжевых грибов.

### **Сколько же часов существует в организме: одни или несколько?**

Морякам и рыбакам давно известно такое явление, как свечение морской воды, вспыхивающей мириадами ярких точек. Поначалу ученые предположили, что свечение вызывает фосфор, испускающий свет при окислении, и само явление получило название «фосфоресценция». Но в 1753 году было установлено, что свет испускают крохотные организмы, и явление переименовали в биолюминесценцию. Светящиеся организмы можно заставить испускать свет под действием самых различных механических раздражителей (удара волн от погруженного в воду весла, от вращающегося судового винта, от рыбьей стаи и т. д.). Рыбаки нередко замечают стаю сардин по изменению биолюминесценции.

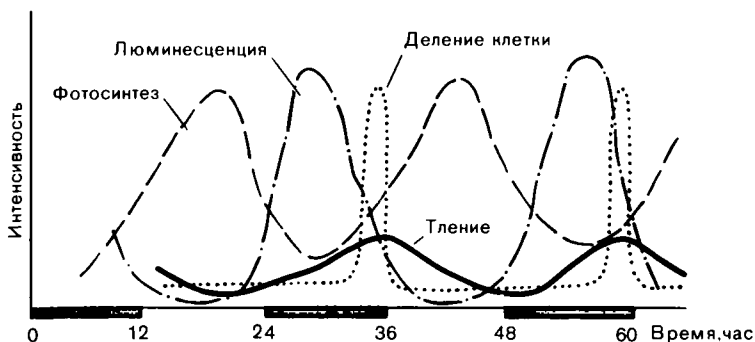
В прибрежных водах чаще всего светятся одноклеточные



жгутиковые *Gonyaulax*. Особи этого вида испускают желто-зеленые световые импульсы, длящиеся около 90 секунд. Эти микроскопические растения сравнительно быстро утомляются на свету, поэтому сила их свечения варьирует: ночью они светятся примерно в 50 раз сильнее, чем днем, когда им приходится как бы состязаться с солнцем. Объясняется это отчасти изменением чувствительности к внешним раздражителям, вызывающим свечение (к ночи она повышается), отчасти активацией ферментов, играющих основную роль в «производстве» света, и концентрацией веществ, претерпевающих химические превращения (которая также достигает максимума ночью). При постоянных условиях этот ритм сохраняется до 14 суток.

Помимо люминесценции *Gonyaulax* обнаруживает еще три суточных ритма. К их числу относится, как правило, невидимое невооруженным глазом негаснущее «тление», которое удастся зарегистрировать с помощью чувствительных приборов. В определенное время суток оно достигает своего максимума, но эта вспышка весьма непродолжительна.

Третье явление — уже упоминавшееся «закрытие ворот» для деления клеток, происходящее с 24-часовой перио-



Ритм деления одноклеточной жгутиковой водоросли *Gonyaulax* при нормальном чередовании света и темноты.

дичностью; четвертое — изменение скорости фотосинтеза. Последнее явление было открыто в 1957 году биологами, занимающимися изучением обитателей морей и океанов. Исследуя образцы крохотных растений, плавающих в морской воде, они установили, что утром фотосинтез в водорослях происходит в 5–7 раз интенсивнее, чем к вечеру. Поскольку образцы были неоднородными и различие могло быть вызвано многими факторами, в дальнейшем опыты проводились в контролируемых условиях: при освещении постоянной интенсивности, на водорослях одного и того же вида. Из колонии водорослей *Gonyaulax*, содержащейся при нормальных соотношениях периодов света и темноты, через определенные промежутки времени брали пробу и, помещая ее под источник света одной и той же интенсивности,

добавляли к ней двуокись углерода, несущую радиоактивные атомы углерода. (Радиоактивный изотоп углерода облегчал измерение скорости фотосинтеза.) Способность жгутиковых водорослей к фотосинтезу была минимальной ночью и достигала максимума в полдень.

То, что водоросли при постоянных условиях обнаруживают четыре ритма с устойчивыми фазами, еще не доказывает наличия единых биологических часов. Гораздо убедительнее об их существовании свидетельствовала бы возможность вызывать различные циклы, варьируя интенсивность одного и того же внешнего воздействия. Наблюдения за циклическими процессами у водорослей, содержащихся при постоянном слабом освещении и шести различных температурах, показали, что в культуре, находившейся при 11,5°C, все рит-

мы замирают, а в пяти остальных культурах по мере повышения температуры (до 25,8°C) обнаруживаются некоторые отклонения периодов. Аналогичным образом кратковременное освещение культур в различное время приводило к одним и тем же сдвигам фазы отдельных циклов. Эти наблюдения делают весьма правдоподобным предположение, что всеми четырьмя периодически процессами действительно управляют одни биологические часы.

Если организм одноклеточный, предположение о том, что у него всего одни часы, достаточно логично. Сложнее обстоит дело, когда речь идет о многоклеточных организмах. Здесь необходимо провести различие между растениями и животными: у последних регулировкой всех процессов занимаются специально приспособленные для этого нервная и гормональная системы.

Согласованная деятельность отдельных органов и клеток у растений в нормальных условиях свидетельствует о том, что каждый из ритмов синхронизируется по чередованию света и темноты. Именно поэтому столь совершенна согласованность ритмов, и именно поэтому ее так легко нарушить, воздействуя извне. Представим себе, например, что лист растения можно принудить совершать

движения с различными фазами. При постоянных условиях сравнительно часто происходит десинхронизация процессов, рассогласованно действуют даже клетки, выполняющие одну и ту же задачу, например клетки подушечек, приводящих лист в движение. Вынужденный совершать движения одновременно в нескольких ритмах, лист «подстраивается» к движению остальных листьев, что свидетельствует о существовании какой-то медленно действующей информационной системы. Кроме того, под воздействием десинхронизирующих процессов между различными ритмами может устанавливаться и устойчивый сдвиг фаз. Однако так происходит не во всех случаях.

У овса, пророщенного при красном свете, суточный ритм отсутствует. Если проростки овса поместить в постоянную темноту, возникает циркадный ритм роста, первый максимум которого всегда приходится на 16-е сутки после «переселения» в темноту. Защитный колпачок первого листа (колеоптиль) прозрачен, что позволяет шаг за шагом проследить за ростом колеоптиля и самого листа. Этим небезынтересным способом удалось установить, что их циркадные ритмы различны: у листа период составляет 24,75 часа, у колеоптиля — 24 часа. Несовпадение



двух ритмов отнюдь не означает, что ими непременно управляют различные часы, но некоторые особенности движения листьев делают такое предположение правдоподобным.

Сходная картина открывается перед нами, когда мы переходим к животным. В их организмах заведомо может быть несколько биологических часов, но их ход вследствие деятельности нервной и гормональной систем строго взаимосвязан. Существование нескольких часов подтверждается тем, что у животных относительно часто происходит десинхронизация ритмов, даже если речь идет о периодических процессах, происходящих в одном органе. Так, различные процессы, идущие в почке, не всегда обладают одним и тем же циркадным периодом. Например, изменения количеств кальция и калия в моче подчиняются различным ритмам. То же можно сказать и об остаточных ритмах, наблюдаемых у взятых из организма органов, тканей и даже клеток. Согласованный ход подавляющего числа циклов, по-видимому, объясняется их многократным взаимодействием, а может быть, функционированием единого центра — главных часов, регулирующих ход остальных. Подробнее об этом мы поговорим в следующей главе.

## Обученная или наследственная ритмичность?

Для лабораторных исследований чаще всего используются такие организмы, которые выросли в естественных условиях или по крайней мере при переменном освещении и, следовательно, испытали на себе действие сигналов окружающей среды с 24-часовым ритмом. По-видимому, суточная периодичность оставила столь глубокий отпечаток на живых организмах, что сохранилась и после того, как внешние факторы перестали изменяться. Иначе говоря, вполне возможно, что формирование ритмов не передается организму по наследству, а требует некоего процесса обучения, в котором в роли учителя выступают биологические часы.

Действительно, в жизнедеятельности организмов, выросших в постоянных условиях, периодические явления часто отсутствуют. Но единственный непериодический внешний сигнал может послужить толчком к запуску циклов. Разумеется, далеко не безразлично, какой сигнал используется при этом. Обычно для запуска циклов используются те самые внешние воздействия, которые обладают способностью восстанавливать замершие циклы: короткий световой импульс, переход

от темноты к свету или температурные раздражители.

Дрозофилы на протяжении 15 поколений содержались в темноте и выходили из куколок в полном беспорядке, но стоило всего один раз включить свет, как ритм восстанавливался: возникал циркадный цикл с периодом, близким к 24-часовому. Существует множество других не менее убедительных примеров, свидетельствующих о том, что ритмичность — черта наследственная.

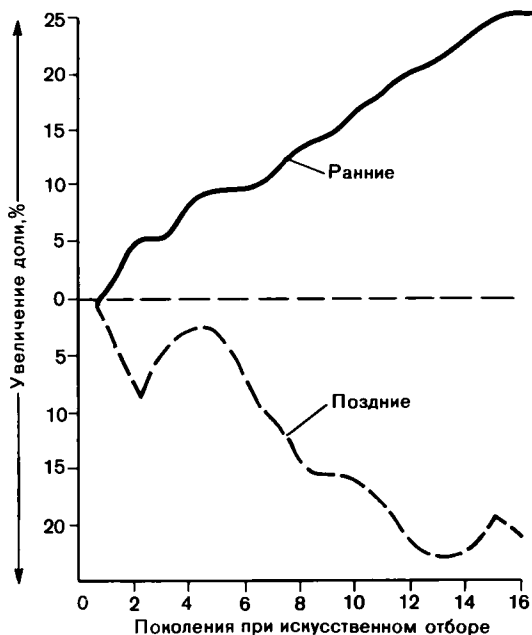
У некоторых животных правильная цикличность процессов наблюдается с момента их появления на свет. Например, у вылупившегося из яйца цыпленка сразу же появляется циркадный ритм. Возможно, выход из яйца запускает часы или какой-то регулирующий механизм, связанный с уже идущими часами. Какой именно внешний сигнал запускает циклы, пока неизвестно. Наличие ритмов у новорожденных млекопитающих не удивительно, так как, находясь в утробе матери, зародыш испытывает на себе влияние циклической активности ее внутренних органов. У зародыша крысы периодически колеблющаяся активность фермента шишковидной железы (эпифиза) проявляется в точном совпадении по фазе с циклом материнского организма. В то же время многочисленные процессы, становящиеся впоследствии

периодическими, на протяжении всего внутриутробного развития и даже более или менее продолжительного периода после рождения лишены циклического характера.

Хорошим примером тому служит цикл *сон — бодрствование* у человека, появляющийся у зародыша на ранней стадии развития. Новорожденные (вопреки широко распространенному мнению) бодрствуют 8–9 часов в сутки. В распределении времени, отводимого на сон, несмотря на то что изрядная доля его приходится на день, имеется заметная асимметрия: 8,5 часа сна приходится на ночь и 6,5 часа — на день. Такое распределение устанавливается с первой недели. Продолжительность ночного сна постепенно достигает 10 часов, а дневной сон сокращается до 3,5 часа.

Таким образом, установление ритмов в более сложных явлениях, зависящих от многих факторов, представляет собой не такой уж простой процесс. Не подлежит сомнению, однако, что циклическая активность — не функция обучения, а способность, передаваемая организму наследственным путем.

По-видимому, генетически закреплены не только способность к периодическому функционированию, но и положение максимума ритма во времени. Такое заключение

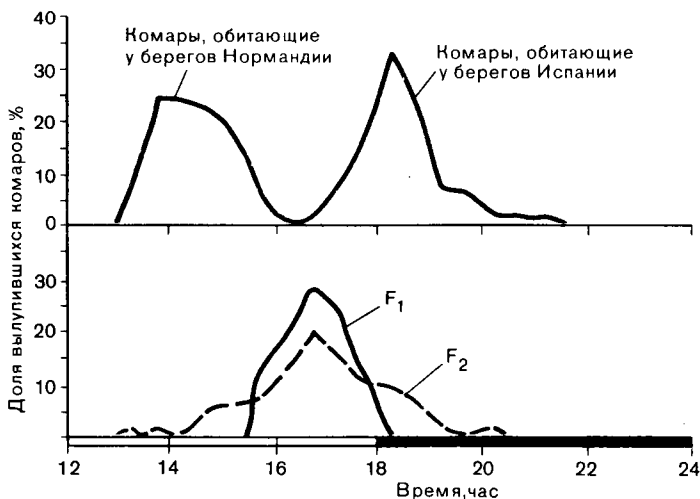


Изменение процентного соотношения между дрозофилами с ранним и поздним выходом из куколок в результате искусственного отбора на протяжении 16 поколений (по данным Д. Л. Клейтона и Дж. В. Пейетта).

подкрепляется следующим экспериментом. На протяжении 16 поколений плодовых мушек, вылуплявшихся из куколок в первые часы на рассвете, скрещивали только с такими же «ранними пташками», а припозднившихся лентяев — с такими же лентьями. В каждом новом поколении подсчитывали соотношение между численностью ранних и поздних мушек и сравнивали с аналогичным соотношением в контрольной группе, в которой дрозофилы размножались

без всяких ограничений. От поколения к поколению различие между распределениями мушек в контрольной группе и в группе с искусственным отбором становилось все заметнее. Потомство ранних мушек предпочитало вылупляться из куколок в первые 4 часа на рассвете. Потомство поздних мушек обнаруживало явную тенденцию к появлению на свет в конце рассвета.

Аналогичные изменения в распределении численности могут происходить и у жи-



Результаты спаривания двух рас комаров-звонцов (*Clunio marinus*), вылупливающих в различное время. На верхней кривой показано распределение по времени вышлота комаров-родителей, внизу — аналогичные распределения первого ( $F_1$ ) и второго ( $F_2$ ) поколений (по данным Ноймана).

вотных, обитающих в естественных условиях. Так, вылупление комара-звонца (*Clunio marinus*) находится в зависимости от фаз Луны и колебаний уровня моря и всегда происходит в определенное время суток и только во время отлива. Вылупление комаров, обитающих на различных территориях, происходит в различное время суток. При спаривании комаров из различных мест обитания потомство появляется на свет в средней точке между моментами наибольшего вышлота родителей; «внуки» — примерно в то же время суток, что и «дети», но их вышлот

имеет более широкое распределение по времени.

Во многих случаях изменение одного-единственного гена может сказаться на продолжительности периода. Плодовых мушек подвергли действию мутагенных агентов и среди всевозможных уродов-мутантов выделили три группы, у которых биологические ритмы — периоды вышлота и двигательной активности — значительно отличались от 24 часов (либо циркадные периоды составляли соответственно 19 и 28 часов, либо цикличность исчезала вовсе). Удалось установить, что во всех трех му-

тациях изменению подверглась одна и та же хромосома. Тем не менее один ген, как правило, еще не определяет период.

Обработав культуру водорослей химическим веществом, пагубно влияющим на гены, выделили четыре типа мутантов, обнаруживших склонность к циклическим колебаниям под действием света

с различными периодами. В этом случае период определяется не одним геном, а суммарным действием нескольких генов. Так, если один из генов приводил к удлинению цикла на полчаса, а другой растягивал цикл на час, то в результате совместного действия этих двух генов период увеличивался на полтора часа.

# Где могут находиться часы?

## Теория внешних и внутренних часов

Мы уже упоминали о двух различных представлениях о регуляции ритмических процессов; каждое из них пытается представить объяснение этому явлению, все еще продолжающему вызывать споры.

Сторонники теории внешних часов отрицают существование самостоятельных внутренних колебаний и утверждают, что периодическая информация поступает извне, а роль биологических часов сводится лишь к тому, чтобы воспринять эту информацию и передать ее дальше. Иначе говоря, сторонники внешней теории уподобляют биологические часы солнечным.

Гораздо больше сторонников у теории внутренних часов. Они предполагают, что внутри живых организмов существуют «часы» со своим автономным внутренним механизмом, порождающим колеба-

ния, а внешние циклические раздражители лишь регулируют точность хода внутренних часов, задавая им 24-часовой ритм.

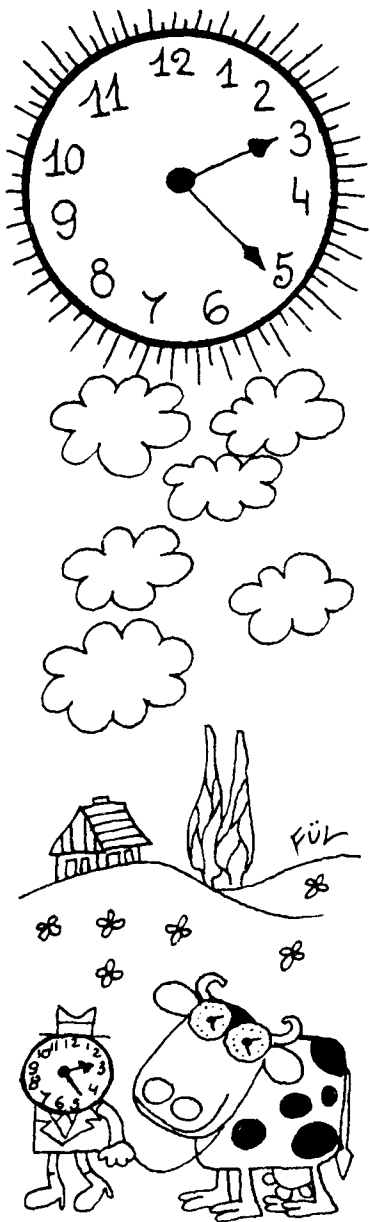
Разумеется, и для внешних часов необходим внутренний механизм, который мы также называем часами, несмотря на то, что он лишь воспринимает и передает ритмические воздействия извне; что же касается внутренних часов, то они не могут точно ходить без сигналов, поступающих из внешней среды.

Сторонники теории внешних часов выдвигают два основных аргумента. Более существенный состоит в том, что представление о биологических часах как о солнечных позволяет весьма легко объяснить устойчивость ритмов по отношению к экспериментальным воздействиям. Так, например, сразу становится понятным, почему обмен веществ не сказывается на периоде циклических процессов и каким образом после установле-

ния ритма может произойти (нередко с абсолютной точностью) настройка по фазе. Не нужно придумывать специальную систему, занимающуюся устранением внешних температурных воздействий, неблагоприятно влияющих на организм. Это важно в том случае, когда (о чем уже говорилось) периоды ритмов не позволяют оценить скорость химических процессов, лежащих в основе действия регулирующих часов. Второй аргумент менее убедителен: несмотря на многолетние упорные поиски внутренних часов, до сих пор не удалось найти такой механизм, который бы удовлетворял всем требованиям и позволил объяснить весь круг явлений.

Дополнительным аргументом в пользу внешних часов служит экономичность: они позволяют обходиться гораздо более простым приемно-передающим устройством, чем если бы живой организм содержал механизм, измеряющий время.

Разумеется, на самом деле внешние часы — «устройство» заведомо более сложное, чем биологический аналог солнечных часов. Действительно, для солнечных часов, например, несущественно, с какой скоростью Солнце движется по небосводу с востока на запад. Если бы промежуток от восхода до захода Солнца длился всего 2 часа, солнечные



часы по-прежнему показывали бы правильное время. Если же мы обратимся к биологическим ритмам, о которых речь уже шла или будет идти в дальнейшем, то отличаться от 24-часовых циклов они могут лишь в узких пределах.

Последнее обстоятельство получает удовлетворительное объяснение в рамках *теории внутренних часов*, поскольку в ней колебание задано и остается варьировать лишь длину периода, плохо поддающуюся изменениям. Если основное колебание по предположению существует во внешней среде, то близость к 24-часовому циклу объясняется тем, что биологические часы получают из окружающей среды обширную информацию и изменение одного параметра не в состоянии нарушить 24-часового цикла. В пользу теории внутренних часов свидетельствуют веские доводы. Из наблюдений давно известно, что у организмов, помещенных в постоянные условия, развиваются циркадные ритмы, причем у каждого организма свои. Более того, периоды различных циклических процессов, протекающих в одном и том же организме, могут не совпадать. Как уже упоминалось, так происходит, если мы станем едва ощутимо варьировать интенсивность освещения или температуру либо добавлять в питьевую воду или пищу тяжелую воду, а в

некоторых случаях и другие вещества. Все эти явления легко объясняются, если предположить существование автономных (то есть не зависящих от внешней среды) внутренних колебаний. У автономного колебания существует характерный, мало изменяющийся период, воздействовать на который можно лишь при постоянных условиях. Внешние сигналы, вступив во взаимодействие с механизмом биологических часов, могут изменять длину периода.

Существование автономных внутренних часов отнюдь нельзя считать доказанным. С помощью предположения о биологических часах, точно выдерживающих суточный ритм, и «стрелках», указывающих для любого цикла величину сдвига фазы, сторонникам теории внешних часов, как мы увидим, удастся если не сделать очевидным, то по крайней мере объяснить циркадный ритм. Следовательно, фазу цикла им необходимо вычислять лишь при так называемых постоянных условиях.

Более проблематична теория внутренних часов. Если их собственный, внутренний период не равен 24 часам, а чуть меньше или чуть больше суток, то при нормальных условиях часы необходимо ежедневно подводить. Известно, однако, что при дальних путе-



шествиях и экспериментально создаваемых сдвигах ритма возникают неприятные субъективные ощущения, поскольку нарушается согласованность ритмических процессов, протекающих с различными скоростями.

Необходимость введения постоянной поправки в ход внутренних часов приводит к плохому самочувствию и даже сокращает жизнь — например, у плодовых мушек (несмотря на то, что внешне они, казалось бы, идеально приспособились к искусственному циклу свет — темнота продолжительностью в 21 или 27 часов). Если существуют внутренние часы с автономным периодом, то нормальное чередование дня и ночи должно казаться тем неестественнее, чем сильнее период циркадного цикла отличается от 24-часового, что не может не сказаться на продолжительности жизни.

В некоторых географически изолированных местностях возраст жителей нередко превышает 100 лет. Можно считать, что в подобных случаях особо благоприятную роль играет чрезвычайно малое отклонение периода циркадного ритма от 24 часов, но подобные предположения беспочвенны, поскольку не доказано ни существование внутренних часов, ни то, что приспособление человека или крупных животных к циклам,

период которого хотя бы незначительно отличается от 24-часового, отрицательно сказывается на продолжительности жизни<sup>1</sup>.

Наконец, нельзя не упомянуть еще об одном аргументе против теории внешних часов: у переселившихся в различные точки земного шара и находящихся там при постоянных условиях живых организмов биологические ритмы должны сразу же приспособиться к местному времени, если биологические часы действительно обладают способностью воспринимать многочисленные периодические внешние сигналы, в том числе и некоторые необычные раздражения. Удалось доказать, например, что крабы и устрицы обладают способностью к такой перестройке, но значение полученных результатов не следует чрезмерно преувеличивать<sup>2</sup>. Серьезный контрдовод против этого аргумента состоит в том, что сам по себе факт приспособления к местному времени отнюдь не

---

<sup>1</sup> Недавние исследования, проведенные советским биоритмологом С. И. Степановой, четко показали, что искусственный цикл с периодом 23,5 часа отрицательно сказывается на самочувствии человека.

<sup>2</sup> Такой перестройки на новое местное время у животных, находящихся в постоянных условиях освещения и температуры, как правило, не происходит.



подтверждает существование внешних часов, а лишь указывает на возможность существования каких-то менее значимых синхронизирующих факторов, которыми ранее пренебрегали.

### **Трудно устранимые воздействия окружающей среды**

Теорией, исходящей из предположения о существовании источника основных колебаний во внешнем мире, по-видимому, удастся объяснить едва ли не все явления. Согласно этой теории, биологические часы не имеют собственного автономного механизма, задающего ритм, и протеканием циклов управляют внешние сигналы. Период внешнего цикла всегда в точности равен 24 часам, поскольку именно в таком ритме изменяются условия в окружающей среде. Лунно-суточные ритмы объясняются либо тем, что существуют особые часы, обладающие такой периодичностью (которая действительно наблюдается в сигналах, поступающих из окружающей среды), либо тем, что приливные ритмы регулируются часами, имеющими суточный период, через «зубчатую передачу» с соответствующим передаточным числом. Воспринимаемые нами циклические процессы – не более чем «стрелки» часов, циркадные периоды

которых обусловлены действием системы, регулирующей фазу. В этой связи возникают два вопроса: какие внешние сигналы при постоянных условиях сказываются лишь на временных признаках и как они, вызывая сдвиг фазы, формируют циркадный ритм?

Под так называемыми постоянными условиями обычно понимают температурные условия и освещенность. Но помимо температуры и освещенности имеется немало других факторов, колеблющихся с суточным периодом. К их числу относится атмосферное давление, на котором сказываются не только приливно-отливные колебания атмосферы под действием Солнца и Луны, но и нагревание атмосферы солнечными лучами, шум, доносящийся в лабораторию с улицы или из соседнего помещения, и т. д. Первые опыты, которые привели к гипотезе внешних часов, производились над растениями, выращиваемыми в герметически закрытых контейнерах, изолированных от колебаний атмосферного давления и всяких шумов, — над вырезанными из картофельных клубней цилиндриками с одиночным глазком, из которого развивался росток. Тем не менее правильные суточные колебания обменных процессов наблюдались даже через несколько лет. Были зарегистрированы мно-

голетние колебания и даже вариации ритма в течение года. Наблюдения производились над различными видами растений, и результаты, полученные в первых опытах, как правило, многократно подтверждались.

Поразительная точность наблюдаемых ритмов натолкнула ученых на мысль, что в окружающей среде существует какой-то периодически изменяющийся фактор, постоянно «уведомляющий» растения о ходе времени, устранить который им так и не удалось. Первое подозрение пало на земной магнетизм, имеющий очень малые, но заметные суточные колебания.

Давно известно, что искусственные магнитные поля, многократно превосходящие по интенсивности естественное магнитное поле Земли, оказывают влияние на различные жизненные процессы. Что касается биоритмов, то были исследованы в основном магнитное поле Земли и поля, незначительно отличающиеся от него по интенсивности. В результате опытов удалось показать, что многие животные, в том числе медоносные пчелы, мухи, некоторые воробьиные птицы, почтовые голуби, ресничные черви и отдельные брюхоногие моллюски, способны воспринимать слабые магнитные поля и, следовательно, магнитное поле Земли.

Исследования проводились в два этапа: какой-нибудь процесс, например поворот ресничного червя в сторону от света, наблюдался сначала в нормальных условиях, а затем при включении слабого искусственного магнитного поля. Если результаты двух наблюдений отличались, то это означало, что подопытное животное ощущает магнитное поле.

Более интересными оказались результаты опытов с почтовыми голубями. Сильный постоянный магнит, укрепленный на голове голубя, нарушал способность птицы ориентироваться в полете. Если же на голове голубя укрепляли катушку, по обмотке которой пропускали ток, то при изменении направления тока и, следовательно, создаваемого им электромагнитного поля на обратное птица разворачивалась на  $180^\circ$  и летела в обратную сторону. Все это свидетельствует о том, что птицы не только ощущают интенсивность магнитного поля, но и используют его для ориентации<sup>1</sup>.

Слабые электрические поля также могут влиять на поведение животных и, следовательно, восприниматься ими. Акула реагирует на изменение на-

пряженности в  $0,01$  мВ/см, что, по всей вероятности, помогает ей обнаруживать скрывающуюся жертву, биотоки которой создают электрическое поле примерно такой же напряженности. Но столь высокая чувствительность, возможно, несет особую функцию, имеющую мало общего с биологическими часами. Например, американский угорь способен ощущать электрическое поле океанических течений.

Из всех этих исследований можно сделать лишь один вывод: некоторые организмы воспринимают многие факторы (например, магнитные и электрические поля, а также различного рода излучения), на которые мы не обращаем никакого внимания. Однако подобный вывод отнюдь не означает, что эти факторы способны ощущать все животные и растения, и еще в меньшей степени он означает, что эти слабые воздействия обеспечивают точный ход биологических часов.

В экспериментах, проведенных на дне пещер, в соляных коях, на большой глубине под поверхностью Земли, куда в лучшем случае могли попасть лишь те космические лучи, которые обладают наибольшей энергией, наблюдались циркадные ритмы. Не прекращались суточные биологические ритмы и у членов научно-исследовательских вы-

<sup>1</sup> Недавно американскими исследователями были обнаружены в мозге голубя и в теле многих других животных мельчайшие кристаллы ферромагнетиков.

сокоширотных экспедиций, хотя вблизи Северного полюса колебания земного магнетизма минимальны. Были отмечены также периодически повторяющиеся явления и у организмов, находившихся на борту искусственных спутников Земли.

Несмотря на то что ни в одном случае не удалось полностью исключить влияние внешних воздействий, имеющих четко выраженный ритм, результаты опытов и наблюдений позволяют считать существование внутренних часов более правдоподобным.

### **Точные «суточные» биологические часы и неточные ритмы**

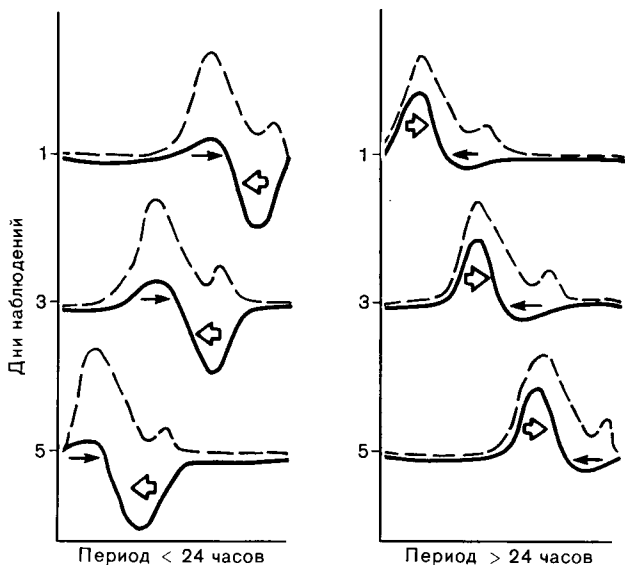
Прежде чем мы начнем обсуждение теории внешних часов, давайте рассмотрим, как она объясняет возникновение циркадного периода. Со многих точек зрения эта теория более правдоподобна, чем предположение о том, что биологические часы с периодом, обычно исходно отличающимся от 24-часового, должны устанавливать продолжительность периода соответственно циклам окружающей среды.

Согласно теории внешних часов, биологические часы естественно наделены 24-часовым ритмом, поскольку следуют изменениям внешних периодических раздражи-

телей. При постоянных условиях необходимость во вмешательстве в ход часов отпадает. А что произойдет, если организм поместить в изменяющуюся среду, но с температурой, поддерживаемой на одном и том же уровне?

С одной стороны, исчезает периодичность двух раздражителей, что, согласно теории, не слишком сбивает ход часов, поскольку те не страдают от отсутствия информации. Наоборот, различного рода взаимосвязи и взаимодействия позволяют организму отбирать, классифицировать и перерабатывать огромное количество информации.

С другой стороны, свет воздействует на ритм организма в такие промежутки времени, когда это воздействие в соответствии с кривой фазового отклика порождает либо отставание, либо опережение по фазе. Если бы кривая фазового отклика была симметрична, то сдвиги фаз в противоположных направлениях оказывали бы зеркально-симметричные воздействия на организм. Но, как правило, вершина либо опережающей, либо отстающей части кривой оказывается выше вершины другой ее части, то есть одна часть кривой имеет перевес над другой, и поэтому при постоянной освещенности происходит либо удлинение, либо сокращение периода цикла.



Теория внешних часов объясняет существование периодов, отличающихся при постоянных условиях от 24 часов, асимметрией кривой фазового отклика. Если у кривой стадия опережения занимает больший отрезок (слева), то при постоянной освещенности все циклы значительно ускорятся и период становится меньше 24 часов. Если у кривой больший отрезок приходится на стадию отставания (справа), то все циклы замедляются и период становится больше 24 часов.

Для проверки этого утверждения необходимо лишь сравнить циркадный ритм с асимметрией кривой фазового отклика.

В первой главе мы уже упоминали о том, что у животных, ведущих ночной образ жизни, дольше длится фаза запаздывания, а у дневных животных — фаза опережения. По правилу Ашоффа циркадный период ночных животных с увеличением интенсивности света возрастает, а циркадный

период дневных животных сокращается. Это согласуется с предположением о том, что в каждом отдельном цикле наступление запаздывания или опережения зависит от вида кривой фазового отклика, и этим определяется соответственно, будет ли период длиннее или короче 24 часов.

Величина сдвига фаз возрастает с увеличением интенсивности света, как это и было установлено в связи с кривой фазового отклика. Мерой опе-

режения или отставания во всех циклах служит возникающий в организме правильный циркадный ритм с периодом, отличным от 24 часов. Поскольку все встречавшиеся нам до сих пор синхронизирующие факторы удавалось описывать с помощью кривой фазового отклика, поддержание их на постоянном уровне должно оказывать действие, также описываемое кривой фазового отклика.

Среди отдельных изменений влияние на циркадный период генетических факторов всегда можно объяснить различной формой кривой фазового отклика, то есть часы во всех случаях «тикают» с неизменной скоростью. Такое представление, несмотря на его привлекательность, не позволяет удовлетворительно ответить на все вопросы. Непонятно, например, каким образом при постоянном освещении цикл колебаний температуры от низкой до более высокой синхронизирует ритмы, приводя их к единому 24-часовому периоду.

Тем не менее безусловно заслуживает внимания предположение об изменении фазы, вызываемом асимметрией кривой фазового отклика, равно как и то, что внешние часы при нормальных условиях не приходится постоянно подводить.

## Попытки локализовать внутренние часы

Разногласия между сторонниками двух лагерей легко можно было бы уладить, если бы удалось установить, где находятся внутренние часы, и разгадать механизм их действия. Для этого следовало прежде всего попытаться выделить ритмично функционирующие органы, а затем, расчленив их, искать местонахождение биологических часов.

Наблюдая движение листьев у растений, ботаники заметили, что если обнажить среднюю жилку листа, продолжающую жилку черешка, то растение впадает в «сон» и совершает соответствующие движения. Аналогичные результаты были получены и при наблюдениях над цветками одного вида жасмина, произрастающего в субтропиках бассейна Карибского моря. Это весьма мощное растение с благоухающими цветками «специализировалось» к опылению насекомыми. В темноте лепестки его цветков раскрываются, их аромат приманивает наделенных тонким обонянием насекомых, которые и опыляют цветки. Если срезанные ветки жасмина поставить в воду, то характерный ритм раскрытия и закрытия цветков сохраняется и в постоянной темноте, и на по-

стоянном свете. Даже лепестки жасмина, если их срезать и опустить наполовину в воду, издают аромат, но только ночью. Следовательно, периодичность издавания аромата у жасмина вызвана не раскрытием и закрытием цветка, а заключена в механизме самого выделения запаха.

Не удалось локализовать внутренние часы и у животных. Так, сегмент кишки, вырезанной из организма млекопитающего, на протяжении долгого времени сохраняет способность совершать ритмичные червеобразные движения с суточным периодом. Изолированные надпочечники грызунов продолжают реагировать на гормон, регулирующий их деятельность, изменяя чувствительность с циркадным периодом. Сердце хомяка, помещенное в соответствующую среду, еще долго пульсирует с четко выраженным суточным ритмом, следы которого обнаруживаются даже в изолированных клетках. Итак, не вызывает сомнений, что в многоклеточных организмах имеется множество часов, нередко действующих на клеточном уровне.

### **Центральные часы животных**

Следуя дальше в поисках местонахождения часов, можно было бы разделить на части клетку, но такое дробление не

имеет смысла. Если биологические часы умолкнут при разрушении какого-то крошечного органа клетки, то нам было бы трудно решить, поврежден ли основной механизм, измеряющий время, или остановлен один из промежуточных процессов, управляющих наблюдаемым ритмом, то есть ось, на которой сидят стрелки. Можно считать доказанным, что механизм, поиском которого мы занимаемся, находится в клетке, поэтому многоклеточные организмы располагают множеством часов. Ясно и то, что их ход необходимо *согласовывать*. У растений эту функцию, по-видимому, обеспечивают в первую очередь внешние синхронизирующие воздействия. Но у животных (по крайней мере у крупных), у которых регуляцию различных физиологических процессов осуществляют нервная и гормональная системы, аналогичную функцию, скорее всего, выполняют биологические ритмы. Следовательно, должны существовать какие-то *центральные часы*, которым при нормальных условиях подчиняются колебания всех ритмических процессов, идущих в органах, тканях и клетках организма. Эти «детали» организма сохраняют функцию часов, которая может проявиться, либо когда они удалены из организма, либо когда при постоянных условиях отсутствие



внешних синхронизирующих факторов нарушает центральную регуляцию. Если происходит такая десинхронизация, то периоды отдельных ритмических процессов становятся независимыми.

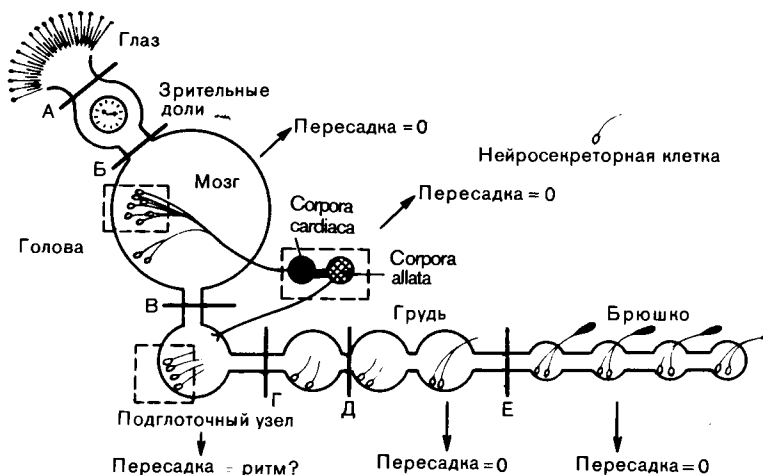
**Регуляция ритмов у насекомых.** Логично предположить, что центральные часы должны располагаться в таком месте, куда особенно легко попадает самый сильный из синхронизирующих факторов — свет.

В конце пятидесятых годов появилась надежда, что центральные часы удалось найти — по крайней мере у таракана. Эти насекомые обрели в современном жилище человека великолепную среду обитания. Пик их двигательной активности приходится на ночное время суток. С наступлением темноты они вылезают из мусорных свалок и, двигаясь по водопроводным и сточным трубам, проникают в квартиры, хозяева которых еще накануне гордо отказывались от услуг дезинфекторов.

Если на шею таракана набросить петлю из тонкой нити и, затянув на ней узел, обезглавить его, таракан продолжает жить до 10 суток и даже сохраняет способность спариваться. Единственное, что изменяется, — это суточный ритм двигательной активности (по сравнению с суточным ритмом тараканов, которых содержат

при постоянном освещении). Английской исследовательнице Дженит Харкер удалось устранить аритмичность в двигательной активности тараканов, вызванную отсечением у них головы, и восстановить циклическую активность насекомых хирургическим путем — сшиванием невредимых тараканов с обезглавленными. Поскольку в опытах Харкер связь двух насекомых осуществлялась только через кровоток, а нервные системы оставались автономными, возникло предположение, что синхронизирующее воздействие передается гормональным путем. В последующей серии опытов было установлено, что при удалении нейросекреторных клеток подглоточного нервного узла суточный ритм нарушается так же, как при отсечении головы. Если нормально функционирующий подглоточный нервный узел пересадить в брюшко аритмичного насекомого, то его суточный ритм двигательной активности восстанавливается. Из всего этого был сделан вывод, что биологические часы могут находиться в подглоточном нервном узле и через голову регулировать ритм с помощью гормонов, вырабатываемых нейросекреторными клетками нервного узла.

Последующие наблюдения не подтвердили результатов Харкер. На приведенном ри-



Регуляция ритма двигательной активности таракана. Ритм исчезает, если разрезы провести в точках Б, В и Г, сохраняется, если разрезы проходят в точках А, Д и Е. Удаление групп клеток, обведенных пунктирными рамками, также не меняет ритма. Пересадка подглоточного нервного узла в те части тела животного, которые сами по себе не задают ритма, не помогает восстановить ритмичность.

сунке схематически изображено тело таракана. Сечения Б, В и Г нарушают ритм, а сечения А, Д и Е не влияют на ритм. Разрушение нейросекреторных клеток мозга и подглоточного нервного узла, а также удаление двух главных органов гормональной регуляции не влияет на цикличность двигательной активности тараканов. Восстановить периодичность путем пересадки нервного узла и органов аритмичному таракану от нормального не удастся. По-видимому, часы находятся в зрительных долях мозга. Синхронизация обеспечивается информацией, поступающей по зрительным

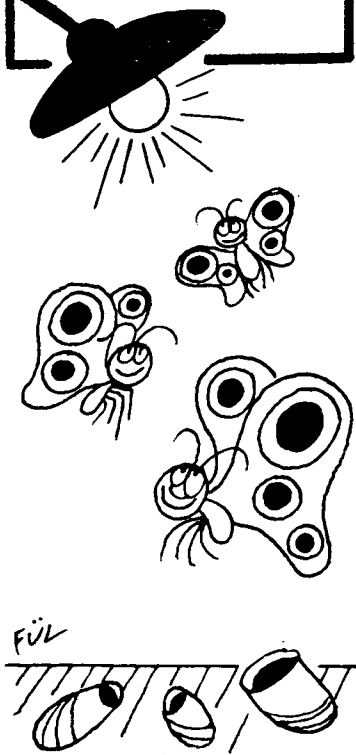
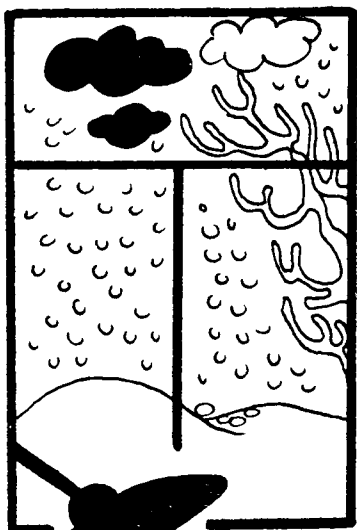
нервам, синхронизирующую функцию выполняет нервная система.

Наблюдения над превращениями шелкопряда подтвердили гипотезу гормональной регуляции. В данном случае речь идет не о суточном ритме, а о времени наступления события, происходящего только один раз в жизни организма, то есть о «контрольно-пропускной» функции часов. Перезимовав, куколка шелкопряда с наступлением более длинных весенних дней превращается в бабочку. Соотношение света и темноты 17:7 хорошо имитирует наступление весны. В этих искусственных условиях кукол-

ка шелкопряда начинает развиваться, и через несколько недель из куколки выходит бабочка. Происходит это в различное время в зависимости от вида шелкопряда. Для экспериментов были выбраны два вида, один из них превращался в бабочку в первые 6 часов светлого времени суток, другой – в последние 5 часов. При содержании в постоянной темноте у бабочек обоих видов развивался 22-часовой циркадный ритм выплода.

При удалении куколкам голов бабочки вылуплялись беспорядочно, но стоило пересадить мозг в брюшко насекомого, и ритм снова восстанавливался. Как и первые опыты с тараканами, это свидетельствовало в пользу гормональной регуляции, поскольку пересаженная часть нервной системы не могла образовать в брюшке нервные связи. Если двум куколкам переставлялись головы, ведущая роль мозга проявлялась особенно наглядно: бабочка выходила из куколки в момент, характерный для того вида, от которого была взята голова, то есть время выхода бабочки диктовалось мозгом.

Нервная система обладает способностью самостоятельно, совсем не обязательно с помощью глаз, воспринимать световые раздражители. Одной группе куколок шелкопряда мозг пересадили в брюшко,



а куколок контрольной группы оставили нетронутыми. При освещении головы и брюшка в противоположных ритмах для установления времени выхода бабочек из куколок решающим оказался цикл свет — темнота, воздействующий на голову. Весьма вероятно, что если бы мозг у подопытных куколок не был пересажен и сохранилась связь с глазами, то интенсивность света, падающего на глаза, повлияла бы на установление времени выноса бабочек.

**Регуляция циклов у млекопитающих.** В последние годы исследователи вплотную подошли к установлению местонахождения и механизмов действия центральных часов у млекопитающих. Разумеется, работать с крупными животными гораздо труднее, чем с насекомыми, поскольку в организме позвоночных одновременно протекает очень много ритмических процессов, между которыми к тому же существуют сложные взаимосвязи. Весьма трудно, а зачастую и просто невозможно установить «субординацию» между отдельными ритмическими процессами, точно выяснить, какие циклы связаны с биологическими часами, а какие лишь отражают какой-то другой ритмический процесс. Положение облегчается тем, что центральная система регуля-

ции у млекопитающих изучается давно и основательно, и все же в механизме согласования часов, «тикающих» в отдельных органах и тканях, еще остается много неясного.

У основания головного мозга расположен гипофиз. Эта железа внутренней секреции выполняет роль своего рода гормонального «дирижера». Она вырабатывает такие вещества, которые, попадая в кровоток, поступают в находящиеся в различных точках тела другие железы внутренней секреции и регулируют их деятельность. Среди выделяемых гипофизом веществ одни оказывают преимущественное влияние на рост тела, другие стимулируют созревание половых клеток в яичниках или семенниках. Деятельностью гипофиза управляет гипоталамус (отдел промежуточного мозга), соединенный с ним стволом, по которому в гипофиз поступают вещества, стимулирующие или угнетающие его секрецию. Здесь осуществляется нервная и гормональная регуляция. Концентрации веществ, вырабатываемых гипофизом, уровни многих гормонов подвержены 24-часовым колебаниям. Но источник цикличности находится не в самом гипофизе, так как при нарушении его связи с гипоталамусом ритмичность исчезает.

«Напротив» гипофиза (в верхней части промежуточно-

го мозга) находится небольшой орган — эпифиз, или шишковидная железа. Назначение ее долгое время оставалось загадочным, и лишь совсем недавно удалось установить ту роль, которую эпифиз играет в гормональной регуляции. Одним из источников многих загадок, окутывавших этот орган, было предположение о возможности существования на голове у многих ящериц так называемого третьего глаза. Ученым удалось доказать, что и у ныне существующих земноводных на голове имеются чувствительные клетки, реагирующие на свет. Отсюда был сделан вывод, что светочувствительные клетки на голове у воробья, лишённого возможности видеть, и есть тот самый орган, который обеспечивает непосредственное восприятие света мозгом. Но, поскольку и после удаления этого органа у воробья сохранялась способность приспосабливаться к циклу свет — темнота, эту гипотезу отвергли.

Проведенные эксперименты неопровержимо доказали, что информация из сетчатки поступает в шишковидную железу двумя путями. Один из них — окольный зрительный путь, по которому сигналы симпатической нервной системы через шейные узлы доходят до органа. Этот путь с помощью одного фермента регулирует производство эпифи-

зом гормона мелатонина. На свету синтез и выделение мелатонина подавляется, а в темноте усиливается (по крайней мере у крыс). Мелатонин, действующий у низших позвоночных на пигментные клетки, у птиц и млекопитающих тормозит развитие половых желез и секрецию ими гормонов. Ритм выработки мелатонина во многом близок к внешним ритмам. Но если животное, ослепленное или долгое время содержавшееся в постоянной темноте, подвергнуть непрерывному воздействию яркого света, то концентрация мелатонина понизится. Действие гормона проявляется в торможении деятельности гипофиза. Весьма вероятно, что годичные колебания размеров половых желез и выработки половых клеток объясняются колебаниями в секреции мелатонина. Зимой, когда дни короче, а ночи длиннее, эпифиз выделяет много гормона, и половые железы спадают, но по мере приближения весны продолжительность светлой части суток возрастает, производство мелатонина идет на убыль и яичники и семенники увеличиваются.

Среди ферментов эпифиза имеются и такие, выработка которых, не прекращаясь после того, как животное ослеплено или помещено в постоянную темноту, обнаруживает циркадную периодичность.

Поиск путей, участвующих в регуляции, привел к парному ядру, расположенному над перекрестом зрительных нервов и называемому *nucleus suprachiasmaticus*. Через это ядро проходит второй путь, ведущий от сетчатки глаза к эпифизу. К числу остальных частей этого пути, по-видимому, принадлежит и шейный узел симпатической нервной системы. Интересно, что с удалением ядра прекращается не только ритм активности эпифиза, но и (по крайней мере у крыс) ряд других функций в организме, в том числе цикл сон-бодрствование, деятельность питьевого центра, двигательная активность, суточные колебания температуры головного мозга. Если ядро функционирует нормально, а животное по каким-то причинам (из-за слепоты или постоянной темноты) не может ощущать смену света и темноты, то все процессы протекают с циркадным ритмом. Создается впечатление, что у млекопитающих именно в ядре находятся центральные часы, которые, воздействуя на гипоталамус и (или) на эпифиз, регулируют 24-часовые циклы нервной и гормональной систем. Но чтобы окончательно устранить все сомнения и распространить полученные выводы на другие виды животных, потребуется еще немало новых наблюдений.

## Представления о механизме часов

Многочисленные попытки уточнить местонахождение центральных часов и составить хотя бы приблизительный перечень способов, какими они воздействуют на регулируемые процессы, не позволили нам приблизиться к пониманию механизма биологических часов, действующего, судя по общим признакам, на клеточном уровне. Относительно механизма биологических часов мы располагаем только представлениями или гипотезами, способными объяснить лишь более или менее широкий круг фактов в зависимости от того, какую модель изучаемого явления удалось построить исследователю.

**Обмен веществ.** Как показали наблюдения, скорости многих биохимических реакций испытывают правильные периодические колебания. В частности, это относится к *расщеплению сахаров* дрожжевыми грибами. Если грибы посеять на жидкую питательную среду, содержащую 2% глюкозы, а затем поместить их в анаэробные условия, то концентрация восстановленного кофермента NADH, характеризующего сгорание сахара, будет совершать колебания с периодом 33 секунды. Эти колебания не за-

тухают. Более того, после некоторого спада вначале их амплитуда даже несколько возрастает. Если приготовить из дрожжевых клеток вытяжку и добавить к ней олигосахарид, известный под названием трегалоза, то колебания будут сохраняться на протяжении нескольких часов. В одном из подобных экспериментов ритмические колебания концентрации NADH наблюдались почти 9 часов с периодом, обычно составлявшим около 7 минут, то есть значительно превосходящим период колебаний в живой клетке. Добавляя к экстракту аккумулятор энергии — аденозинтрифосфат, можно изменять фазу колебаний в зависимости от того, в какой точке кривой фазового отклика произведена добавка. Таким образом, колебания концентрации NADH во многом сходны с биологическим ритмом, но отличаются более коротким периодом, в значительной степени зависят от температуры и не обладают способностью приспособиться к циклу свет — темнота.

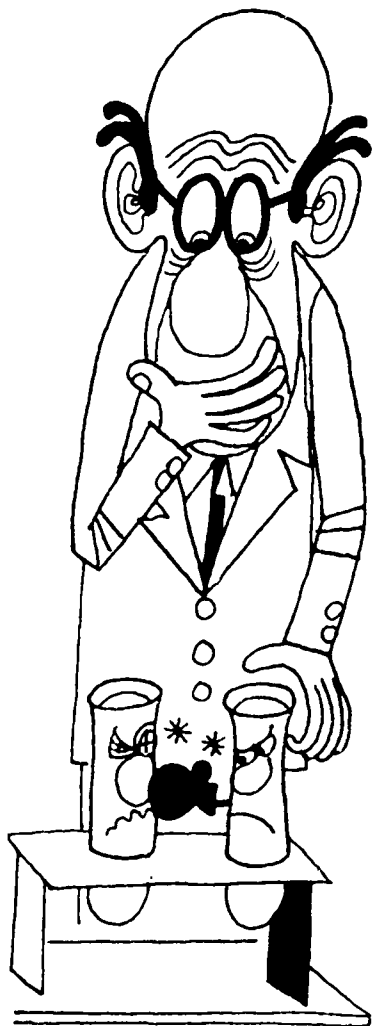
В живых организмах довольно широко встречаются и другие ритмические реакции. Они возникают в тех случаях, когда налицо довольно простое условие: наличие двух веществ X и Y, причем вещество X увеличивает выработку вещества Y, а вещество Y уменьшает выработку вещества X. В

реакциях, протекающих в вытяжке из дрожжей, присутствии таких веществ устанавливается без труда.

При исследовании скоростей реакций широко используется *численное моделирование на ЭВМ*, позволяющее установить влияние фазы изменения концентрации того или иного промежуточного вещества. На многих моделях удалось продемонстрировать независимость ритмов от температуры и даже (путем введения элементарных ступеней, активируемых светом) способность адаптироваться к чередованию света и темноты. Нерешенной осталась одна серьезная проблема: продолжительность периода пока остается недостаточно большой. Правда, на ЭВМ удалось просчитать немало сложных моделей, в которых период наблюдаемых колебаний возникал в результате взаимодействия стадий с малыми периодами, но такого рода теории пока звучат не слишком убедительно.

**Возможная роль ДНК.** После того как в синтезе белков была установлена роль ДНК, нуклеиновые кислоты приобрели необычайную популярность и их начали к стати и не к стати привлекать к объяснению многих нерешенных биологических проблем. Не удивительно, что некоторые ис-

FVL

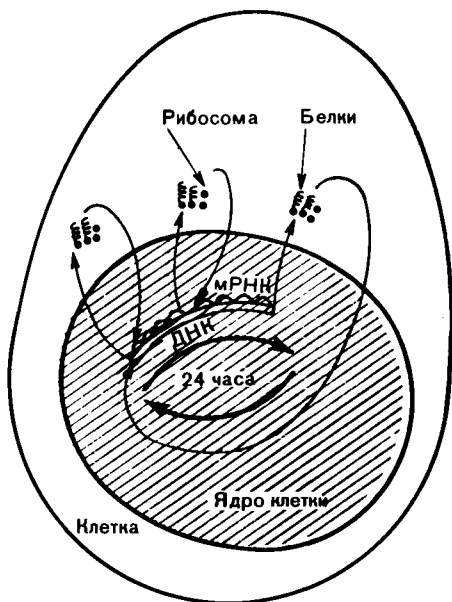


следователи стали связывать с ДНК не только память животных, но и ключевые проблемы биологических часов.

Из наследственного вещества фермент полимеразы изготавливает копию РНК, соединяя в цепочку при температуре  $37^{\circ}\text{C}$  от 30 до 40 нуклеотидов в секунду. Если синтез не идет одновременно на различных участках, то всю генетическую информацию кишечной палочки (*Escherichia coli*) можно переписать в РНК менее чем за 33 часа. Иначе говоря, за один *клеточный цикл* (промежуток времени от одного деления клетки до другого, составляющий у кишечной палочки около 20 секунд) происходит только 1% записи. Вероятно, для возникновения более продолжительных периодов требуется несколько участков ДНК, каждый из которых «заведует» веществом, включающимся в строго определенный период записи. Таким веществом мог бы быть, например, специфический для РНК-полимеразы участок молекулярной цепи, делающий возможным присоединение фермента к другой точке ДНК. Из теорий подобного типа наиболее разработана *концепция хронона*.

Хронон представляет собой своего рода молекулярную линию «временной задержки» — согласованно функционирующий фрагмент ДНК,





Концепция хронона исходит из предположения о циклическом копировании (репликации) фрагмента цепи ДНК, содержащего информацию, необходимую для синтеза цепи из 200–2000 белков. Отдельный фрагмент может вызвать копирование матричной РНК (мРНК) только в том случае, если белок, соответствующий начальному фрагменту цепи, синтезирован и возвратился в ядро. Весь процесс длится 24 часа. Последняя цепочка белков начинает репликацию первого фрагмента цепи ДНК.

состоящий из нескольких отрезков и содержащий информацию, необходимую для синтеза 200–2000 полипептидных цепей. В РНК для записи «инструкции» о времени синтеза каждого блока молекулы ДНК имеется специальный сигнал-белок, заполняющий первый отрезок цепи. Когда репликация доходит до последнего отрезка хронона, появляется вещество, способное начать весь процесс заново. Длина фрагмента мо-

лекулы ДНК эволюционировала параллельно скорости синтеза информационной (матричной) РНК, так что теперь на протекание всего процесса требуется около 24 часов. Введя стадии, активируемые светом, мы можем получить систему, способную воспроизводить смену дня и ночи.

Весьма важная особенность модели хронона состоит в том, что для репликации матричной РНК полипептидная цепь должна выйти из ядра к месту син-

теза белка и вернуться отсюда в ДНК, тем самым воздействуя на нее. Эти диффузионные стадии процесса с повышением температуры замедляются, компенсируя увеличение скорости химических реакций, и обеспечивают независимость хода регулирующего механизма от температуры окружающей среды. Возможно, что тяжелая вода также тормозит протекание процессов.

С тех пор как была создана модель хронона, выяснилось, что биологические ритмы могут существовать и у низших простейших, или прокариотов, лишенных обособленного ядра, например у бактерий, хотя диффузионные стадии заведомо исключены, так как наружная оболочка этих организмов не пропускает ДНК. Против роли, отводимой ДНК в концепции хронона, свидетельствует и то, что циклические колебания интенсивности фотосинтеза у зеленой водоросли *Acetabularia* не прекращаются после удаления клеточного ядра. И хотя ДНК может находиться не только в ядре, но и в других органах клетки, ссылка на это вряд ли убедительна, поскольку трудно себе представить, что каждый из органов содержит по одному хронону.

**Мембранная модель часов.** Гораздо более правдоподобное

объяснение всего круга явлений дает теория, основанная на изучении механизма движения растений, согласно которой биологические часы локализируются на клеточной мембране.

Обратная связь, которую мы в общих чертах описали на примере биохимических реакций, в этой модели осуществляется между элементами мембраны, выполняющими транспорт ионов, и градиентами концентрации ионов.

Согласно новейшим представлениям, клеточная мембрана может состоять из двух слоев жироподобного вещества, в которых, как айсберги в море, плавают белковые молекулы<sup>1</sup>. Под «плаванием» в данном случае имеется в виду легкое перемещение молекул белка вдоль слоев жироподобного вещества, поскольку связи между ними не очень прочны и для их разрыва не требуется большой энергии. Белки погружены в море липидов на большую или меньшую глубину в зависимости от организма. Те части белков, которые из-за химического сродства к жироподобным веществам могут образовывать боковые связи (липофильные части), погружаются в «море», остальные выступают наружу.

---

<sup>1</sup>Это только одна из возможных «конструкций» клеточной мембраны.

Молекула белка может проходить и сквозь клеточную мембрану, тогда ее части торчат по обе стороны мембраны.

Находящиеся в мембране ферменты и пептиды, выполняющие особые функции, нередко обретают способность действовать лишь после того, как образующие их отдельные цепи соединятся друг с другом. По современной теории, такие составленные из отдельных субъединиц белки, транспортирующие ионы калия, находятся в клеточной мембране. Если концентрации ионов калия по обе стороны мембраны отличаются незначительно, то плавающие в слое липидов пептидные цепи встречаются и соединяются. Начинается активный транспорт калия. Когда же образующийся в результате переноса ионов калия градиент концентрации достигает определенной величины, субъединицы расходятся, и начинается пассивное выравнивание концентраций.

Приспособление к световому циклу в мембранной модели обеспечивается «воротами», которые либо обладают светочувствительностью, либо соединены гормональными или нервными путями с находящимся где-то в стороне фоторецептором. Под воздействием света «ворота» открываются, и через них начинают проходить ионы калия. Если световой импульс достигнет

клеточной мембраны в стадии формирования градиента концентрации, то выход градиента на пороговое значение произойдет с некоторой задержкой. Если же световой импульс достигнет мембраны на стадии пассивного выравнивания концентраций, то активный транспорт ионов калия начнется с некоторым опережением. Следовательно, в зависимости от времени подачи светового импульса происходит либо отставание, либо опережение по фазе. Устойчивость по отношению к колебаниям температуры обеспечивают отчасти диффузионные стадии, отчасти особенности поведения липидов.

С мембранной теорией хорошо согласуются результаты многочисленных исследований. Невозможность полностью разрушить часы торможением синтеза белков или РНК эта теория объясняет тем, что на клеточной мембране находятся вещества, вызывающие сдвиг фаз.

«Колесики» часового механизма различных биологических ритмов сцеплены по-разному. В одних случаях сцепление происходит напрямую (таковы, например, движения, совершаемые в периоде «сна» листьями бобовых, «светобоязнь» и «светолюбие» одноклеточных). В других случаях сцепление идет где-то на заднем плане (так, вызы-

ваемые ионами активность и торможение ферментов, возможно, оказывают стимулирующее влияние на действие гормонов). В случае нервной клетки связующим звеном было бы изменение мембранного потенциала, оказывающее решающее значение на раздражимость клетки.

Ясно одно: прежде чем мы достигнем окончательного понимания механизма биологических часов, нам предстоит многое узнать, возможно, не раз переделать модель и даже отказаться от существующей ныне теории и разработать новую.

# Влияние Луны на жизнь на Земле

## Влияние ритма, задаваемого движением Луны

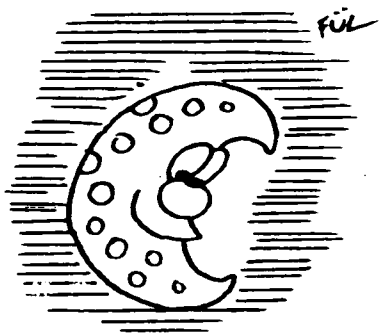
Из всех небесных тел Луна, по-видимому, была первым после Солнца светилом, которое с незапамятных времен привлекало внимание человека. Неисчислимы легенды и суеверия о магическом влиянии естественного спутника Земли (вспомним хотя бы небылицы о лунатизме). Однако свет и создаваемое массой Луны притяжение действительно оказывают влияние на жизнь на Земле. И этот факт неоспорим.

Луна совершает один оборот вокруг Земли примерно за 29,5 суток. За это время Солнце по-разному освещает обращенную к нам сторону Луны. Когда Луна находится между Землей и Солнцем, «видима» только темная часть Луны, иными словами, Луна невидима. Эта фаза называется новолунием. Наоборот, во время полнолуния Луна находится по другую сторону от Земли, чем Солнце, и лучи всей солнечной короны освещают ее

видимую часть по ночам. От новолуния освещенная часть Луны с каждым днем увеличивается, а по достижении полнолуния идет на убыль. Когда освещена ровно половина лунного диска, говорят, что Луна находится в первой или третьей четверти в зависимости от того, нарастает или убывает освещенная часть ее видимой стороны. Так проходит синодический период обращения Луны, или *лунный* месяц.

Из-за вращения Земли Луна каждый день восходит на 50 минут позже, чем накануне: пока Земля вращается вокруг своей оси, Луна продолжает путь, и для того, чтобы снова взойти над горизонтом, ей требуется 50 минут на доворот. Именно поэтому лунные сутки длятся не 24, а 24,8 часа.

На Землю попадает не только разгоняющий ночную тьму свет полной Луны. Сила лунного притяжения приводит в движение воды морей и океанов. Поэтому уровень воды в большей части морей подвержен ритмическим изменениям. Во время прилива вода затоп-

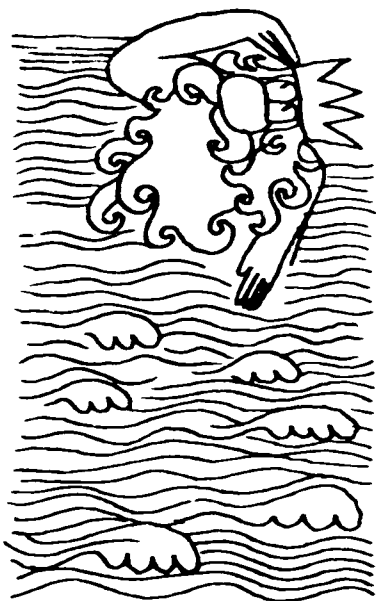


ляет полоску суши, во время отлива снова отступает.

Земля и Луна обращаются вокруг общего центра притяжения, то есть центр орбиты Луны не совпадает с центром Земли.

Вращение системы Земля—Луна вокруг общего центра притяжения приводит к возникновению центробежной силы. По величине она равна силе притяжения, с которой Луна действует на центр Земли, но противоположна по направлению. Под действием центробежной силы, то есть под действием силы притяжения Луны, приходят в движение находящиеся на поверхности Земли гидросфера, атмосфера и в меньшей степени земная кора. Сила притяжения Луны максимальна на той части земной поверхности, которая обращена к Луне, центробежная сила максимальна на противоположной части земной поверхности. Следовательно, если бы вся Земля была покрыта сплошным слоем воды, то прилив всегда наблюдался бы в двух местах: в той части земной поверхности, которая расположена ближе всего к Луне, и в той, где она дальше всего отстоит от Луны. По мере приближения к полюсам постепенно осталась бы одна приливная волна.

## ЖЕПТУЖ



Поскольку в действительности поверхность Земли существенно отличается от

идеальной и на формирование приливов влияют многочисленные факторы, связанные с конфигурацией Земли (впадины, воздушные и морские течения, высота рельефа относительно уровня моря и т. д.), приливный ритм сильно отличается от идеального суточного ритма и амплитуда приливных колебаний изменяется в различных частях Мирового океана. В областях, расположенных не слишком далеко от экватора, воды два раза в сутки затопляют берег: когда участок поверхности Земли обращен к Луне и когда он «смотрит» в противоположную сторону. Что же касается высоты двух приливных волн, то они различны. Нередко наблюдается только одна приливная волна. Высота прилива может значительно варьировать даже на одном и том же градусе широты. Так, например, в Средиземном море высота прилива составляет всего несколько сантиметров, тогда как разность уровней в некоторых частях Тихого океана достигает 12 метров.

Солнце, как и Луна, влияет на динамику уровня моря, рождая в принципе две приливные волны в сутки. Однако Солнце находится на гораздо большем расстоянии от Земли, и, несмотря на очень большую массу, его приливное действие вдвое меньше, чем у Луны. Поэтому оно не создает особого,

«солнечного», приливного ритма, а только иногда усиливает лунные приливы.

Высота уровней в часы прилива максимальна (так называемая высокая вода), когда Солнце, Земля и Луна находятся на одной прямой, то есть в новолуние и полнолуние, и минимальна (низкая вода), когда Луна находится в первой или третьей четверти.

Происходящие дважды в течение лунного месяца сизигийные<sup>1</sup> приливы не следует смешивать с порождаемыми подводными землетрясениями цунами, нередко достигающими в высоту нескольких десятков метров. Обрушиваясь на берег, они причиняют большой ущерб всем обитателям прибрежной полосы.

### **Взаимодействие приливного и суточного ритмов**

Животные, обитающие в прибрежной полосе, дважды в течение суток затопляемой морем (в некоторых местах прилив покрывает сушу только один раз в сутки), должны были приспособиться к исключительным условиям. Не все организмы могут перебираться в безопасную зону с наступлением неблагоприятного периода: во время прилива они пря-

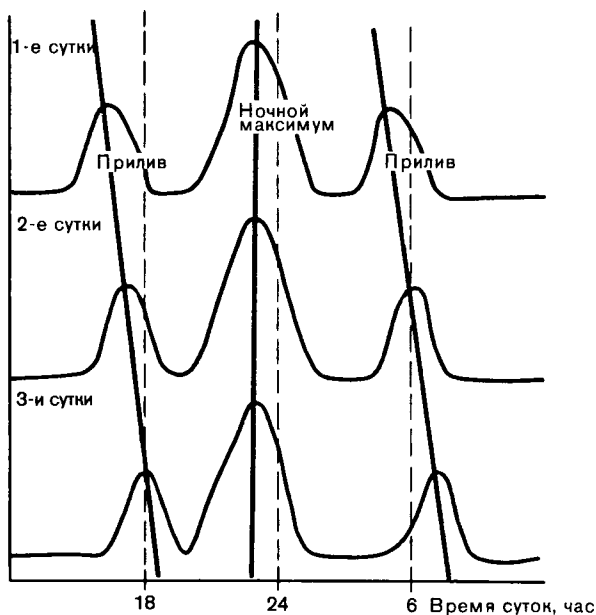
<sup>1</sup> Сизигии – общее название двух фаз Луны: новолуния и полнолуния.

чутся в укромном месте и выходят из своего убежища, лишь когда опасность минует. Отправляясь на поиски пищи, животные выбирают для этого разное время: рыбу манит прибрежная зона в часы прилива, птицы предпочитают полосу у подножия берега, обнажающуюся в часы отлива.

Для обитателей прибрежной полосы жизненно важно заранее знать о приближении неблагоприятного периода. Поэтому в их двигательной активности всегда наблюдается

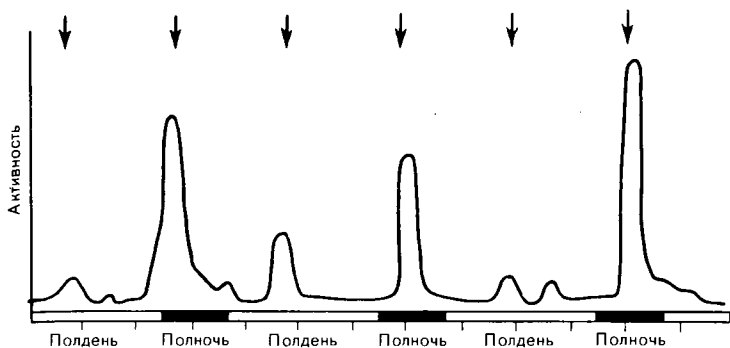
12,4-часовой ритм, а там, где за сутки происходит всего один прилив, — 24,8-часовой ритм, обладающий такими же свойствами, как уже рассмотренный нами суточный ритм. При постоянных условиях этот ритм сохраняется с периодом, весьма близким к естественному. По аналогии с циркадным ритмом ритм, о котором идет речь, стали называть *циркатидальным* (*циркаприливым*).

Приливный ритм относится к ритмам внешне-внутреннего



В двигательной активности краба *Sesarma*, содержавшегося в лаборатории при постоянных условиях, независимо развиваются суточный и приливный ритмы. Ночной максимум всегда приходится на одно и то же время, а максимумы, совпадающие с моментом наступления приливов, сдвигаются вместе с приливами.





Значительное превышение максимума двигательной активности обитателя прибрежной полосы — травяного краба (*Carcinus maenas*) в период ночного прилива над полуденным максимумом объясняется совпадением двух ритмов. Крабы содержались при постоянных условиях. Стрелки вверху указывают время наступления приливов. Темные полосы внизу соответствуют ночным часам (вне лаборатории) и обычно — времени сна крабов.

типа: точность хода какого-то внутреннего осциллятора регулируется колебаниями внешних синхронизирующих факторов, обеспечивающих соответствующий сдвиг фазы. Тем не менее в поведении организмов, обитающих в полосе, затопляемой во время приливов, наблюдается и суточный ритм. Связь суточного и приливно-отливного ритмов осуществляется разными способами. Когда взаимодействие отсутствует, оба ритма идут параллельно, независимо друг от друга. Влияние приливно-отливного ритма заметно даже у обитающих на суше крабов *Sesarma*. Но в активности сухопутных крабов всегда есть *ночной максимум* (около 23 часов), поэтому в лабораторных условиях в их двигательной активности наблюдаются три

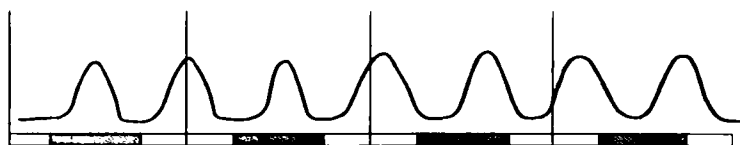
пика: два пика совпадают с наступлением приливов, а третий — ночной максимум.

Береговой зеленый, или травяной, краб (*Carcinus maenas*) также приспособился к жизни в приливно-отливной зоне. Последняя, пятая, пара его ног имеет форму лопаток, заканчивающихся копьевидными остриями, поэтому он не может плавать, как его сородичи, но этот «физический недостаток» компенсируется тем, что во время отлива краб искусно закапывается в песок и выходит из своего укрытия только с наступлением следующего прилива, когда отправляется на поиски пищи. Так ему удастся избежать печальной участи и не стать добычей птиц, обитающих на суше и летающих на полос-

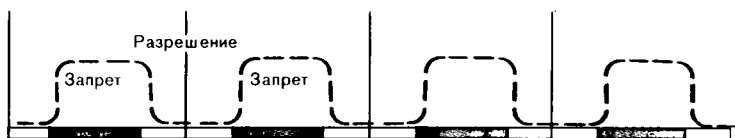
ку морского дна, обнажающуюся в часы отлива.

У крабов *Sesarma* всего два ритма, доминирует ритм, приспособленный к приливам. Действие второго компонента проявляется лишь в том, что пики двигательной активности, совпадающие с наступлением ночного прилива, выше пиков активности, совпадающих с наступлением дневного прилива. Если крабов содержать в лаборатории при постоянных условиях, то через 1–2 недели останется только цир-

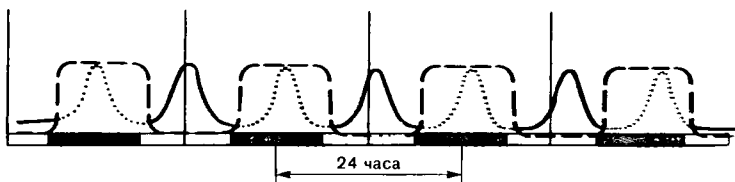
каприливая составляющая общего ритма, после чего суточные колебания активности наблюдаться не будут. Но суточный ритм легко восстанавливается, если крабов подвергнуть шоку холодом, то есть держать в течение 8 часов при температуре 4°C. Метод оказался успешным не только для восстановления цикла, затухающего при постоянных условиях, но и в экспериментах над выведенными в лаборатории из икринок крабами, у которых наблюдался только



Приливный ритм



Суточный ритм запрет — разрешение



Перестройка ритма вертикальных миграций диатомовых водорослей *Hantzschia* объясняется взаимным влиянием двух ритмов: ритма двигательной активности с периодом приливо-отливного цикла и 24-часового ритма запрет — разрешение. Водоросли совершают миграции только при условии, если пик их активности приходится на «разрешенный» промежуток времени.

циркаприливный ритм. Более того, обработка холодом возбуждает циркадный ритм даже у крабов, собранных на побережье Средиземного моря, несмотря на то, что в тех местах колебания уровня моря, связанные с движением Луны, либо вообще отсутствуют, либо минимальны (составляют всего несколько сантиметров). Эти явления объясняются тем, что в основе ритма лежит наследственный, внутренний механизм. При рассмотрении суточных ритмов мы уже упоминали о независимости их периода от температуры окружающей среды.

В еще более отчетливой форме взаимосвязь суточного и приливного ритмов, описанная на примере травяного краба, проявляется в двигательной активности диатомовых водорослей *Hantzschia*. Эти одноклеточные водоросли погружаются в песок, но с наступлением дневного отлива поднимаются наверх и в огромном количестве устилают поверхность песка на обнажившемся морском дне. Песок приобретает странный золотисто-коричневый оттенок: это сквозь панцирь, в который закована каждая микроскопическая водоросль, просвечивает коричневое пигментное вещество. По мере приближения прилива окраска песка изменяется: водоросли снова уходят вглубь.

В лабораторных условиях перемещения диатомовых водорослей вверх и вниз по вертикали наблюдаются даже при искусственно созданных отношениях свет – темнота. Ежедневно очередная миграция по вертикали начинается на 50 минут позже той, что была накануне, — сказывается изменение фазы отлива относительно ритма чередования дня и ночи. Как уже упоминалось, активность диатомовых водорослей приходится только на дневные отливы. Если отлив наступает в сумерки или если держать свет выключенным, вертикальные миграции прекращаются, но через день или два возобновляются уже во время другого отлива, приходящегося на утро.

На первый взгляд можно подумать, что только темнота тормозит вертикальные миграции диатомовых водорослей, но торможение наступает и при перестройке постоянного освещения. Это позволяет говорить о взаимном влиянии «вмонтированных» в организм внутренних механизмов. Наблюдаемое явление становится вполне понятным, если представить себе один циркаприливный ритм активности и один циркадный ритм запрет – разрешение. Для миграций по вертикали необходимо, чтобы пик активности приходился на период «разрешение» второго ритма. Такое «разрешение»



действует подобно уже известному нам «контрольно-пропускному» механизму, но отличается тем, что «ворота» распахнуты шире и охватывают целый день.

### Часы, регулирующие ритмы

Итак, мы видели, что у обитателей приливно-отливной зоны имеются приспособленные к колебаниям уровня моря ритмические процессы, из которых при постоянных условиях остаются только процессы с наибольшим периодом, то есть с циркаприливым циклом. Параллельно циркаприливному циклу нередко устанавливаются и циркадные колебания.

В связи с механизмом этого явления возникают два вопроса: что связывает между собой часы, регулирующие ритмы с двумя независимыми частотами, и существует ли двое часов, или, точнее, внешних сигналов, играющих роль синхронизирующих факторов в процессе приспособления к колебаниям уровня моря?

Результаты многих исследований наводят на мысль, что два ритма с различными периодами регулируются одними часами. Однако в их механизме должны быть «зубчатые передачи», позволяющие преобразовывать частоты. А поскольку ни сами часы, ни их «зубчатые передачи» не из-

вестны, представить себе, как они действуют, весьма трудно.

Наиболее убедительным доводом в пользу общих часов было бы такое воздействие, которое одинаково влияло бы на два процесса.

Манящие крабы (*Uca minax*) — обычные обитатели приливо-отливной зоны Южных морей. Свое название они получили потому, что самцы, оказавшись в брачный период близости от самок, начинают возбужденно размахивать большей клешней. Продолжительность одного кругообразного взмаха составляет около 2 секунд, и чем больше возбужден краб, тем чаще он машет клешней. Во время отлива манящие крабы выходят на сушу из своих норок и отправляются на поиски съедобного в слое ила. При постоянных лабораторных условиях у манящих крабов наблюдается циркаприливный ритм с периодом несколько продолжительнее 24,8 часа. При правильных 24-часовых чередованиях света и темноты продолжительность цикла составляет ровно 24,8 часа. Если продолжительность суток искусственно увеличить до 24,8 часа, то точность циркаприливого ритма от этого не улучшится, а ухудшится: период увеличится на 0,8 часа и станет равным 25,6 часа. Фаза суточного ритма немного сдвинута относительно цикла светового сигнала,

точнее относительно циклических изменений свет — темнота. Аналогичный сдвиг наблюдается и у приливно-отливного ритма.

В рассмотренном нами примере между двумя колебаниями существует тесная связь. Это позволяет предположить, что в действительности всеми процессами управляют одни часы. Логически такое предположение вполне приемлемо — природе невыгодно создавать и запускать двое часов с периодами, отличающимися всего на 3%, и способных в отсутствие синхронизирующих факторов воспроизводить характерный период друг друга<sup>1</sup>.

### **Синхронизирующие раздражители, связанные с приливами и отливами**

Сколько бы ни было часов, ясно, что решающую роль в задании фаз играют факторы, каким-то образом зависящие от приливных колебаний уровня моря. В принципе можно представить себе, что синхронизирующее влияние оказывает суточный ритм, но тогда система была бы слишком жесткой и не могла бы гибко

---

<sup>1</sup> В настоящее время считается наиболее вероятным существование в одном организме многих биологических часов с близкими, но часто неравными периодами.

приспосабливаться к местным условиям. Действительно, разность фаз между ритмом свет-темнота и приливным ритмом не только увеличивается ежедневно на 50 минут, но и подвержена сильным вариациям в зависимости от рельефа отдельных участков морского дна. Высота над уровнем моря тех мест, где находятся животные, зависит от того, когда наступает прилив. Животные, переселенные в места с иным расписанием приливов и отливов, быстро приспосабливаются к местным условиям, а животные, вообще не знакомые с колебаниями уровня моря, переселившись на побережье, вскоре привыкают к новому режиму.

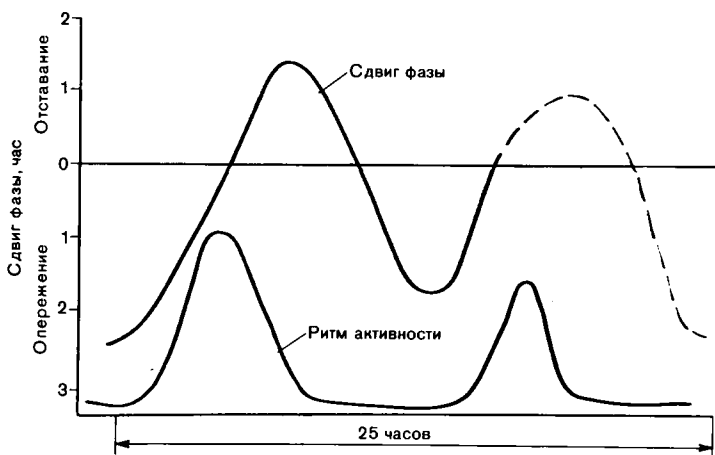
Самое простое предположение состоит в том, что синхронизирующим фактором является сама вода, точнее ее уровень или отклонение его от некоторого уровня, принятого за нулевой. Береговые крабы содержались в условиях искусственного приливного ритма: в течение 6,2 часа они находились на воздухе, в течение следующих 6,2 часа – по «шейку» в морской воде, затем снова 6,2 часа – на суше и т. д. Температура воздуха и воды была одинаковой, 19°C. Наибольшая активность у животных наблюдалась в воде (в естественных условиях обитания они всегда оживляются в период прилива). Такая обработка

подопытных животных продолжалась на протяжении 5 суток, после чего крабов поместили во влажную атмосферу. Искусственно созданный приливный ритм не сказался сколько-нибудь заметно на поведении животных, ожидаемый 12,4-часовой ритм не появился. Эксперимент повторили, но в измененных температурных условиях: на этот раз воздух был теплым (24°C), а вода – холодной (13°C). После 5-дневной обработки желаемый эффект был достигнут: при постоянных условиях крабы становились активнее к тому времени, когда их обычно погружали в холодную воду. Таким образом, определяющим фактором в данном эксперименте следует считать не затопление береговой полосы, а скорее всего, связанное с ним изменение температуры. Это предположение подкрепили еще одним опытом, в котором воду вообще исключили, а температуру в течение 6,2 часа держали на уровне 24°C, затем понижали до 13°C и на этом уровне выдерживали следующие 6,2 часа, после чего снова повышали до 24°C и т. д. Эффект остался, хотя выражен он был слабее, чем в том случае, когда крабов погружали в воду.

Температура – не единственный внешний параметр, способный возбудить у берегового краба остаточный при-

ливный ритм. Изменения атмосферного давления также оказывают синхронизирующее действие. У крабов, находившихся в течение 6,2 часа в гипербарической камере, где давление воздуха в полтора раза превышало нормальное, также появился остаточный циркаприливный ритм двигательной активности. Максимум активности приходился на тот период, в котором давление было больше. При нормальных условиях с учетом изменений давления воздуха, вызываемых приливно-отливными движениями атмосферы, полученные данные соответствуют тому, что во время приливов крабы ока-

зываются под слоем воды толщиной 5-6 метров. В некоторых районах высота воды во время приливов довольно часто достигает такой величины, но для того чтобы атмосферное давление было синхронизирующим фактором, животные должны были бы ощущать более тонкие колебания. Вспомним хотя бы о том, сколь малые колебания интенсивности света сказываются на протекании суточных ритмов. Возможно, регуляцией сдвига фаз внутреннего ритма по отношению к периодическим изменениям внешней среды ведают несколько примерно равных по величине факторов, но ни один из них не играет столь



Связь кривой фазового отклика с ритмом двигательной активности у веслоногих раков *Excirolana*. У раков, содержащихся в аквариуме с принудительным перемешиванием воды в течение 2 часов и при постоянных условиях, фазовый отклик описывается двугорбой кривой.

исключительной роли, как свет в регуляции суточных ритмов<sup>1</sup>.

Какой из факторов важнее, зависит от места обитания организма. Веслоногий рак *Excirolana* отдает предпочтение открытым берегам, на которые обрушиваются тяжкие удары морских волн. Он закапывается в песок в самой верхней части затопляемой зоны, куда вода доходит лишь в пик прилива. Когда уровень воды уже повышается настолько, что первые волны начинают заливать норку, рак вылезает из песка и, суетливо бегая по воде, принимается искать пищу, а примерно через два часа, когда приливная волна схлынет, снова зарывается в песок. В данном случае первичным синхронизирующим фактором является механическое действие прибоя, интенсивность и продолжительность которого ощущаются животными.

Были проведены наблюдения и над животными, обитающими в таких местах, где приливный ритм был сложным: одни сутки высота двух приливных волн одинакова, другие — различна. Более того, в течение одних или двух суток каждого лунного месяца вода

едва заливала берег. В лаборатории у отловленных животных наблюдался прежний суточный ритм с одним или двумя пиками двигательной активности. В последнем случае амплитуды были то одинаковыми, то различными. Лабораторным жилищем раков был стеклянный аквариум, на дно которого насыпали слой песка. Механическое действие прилива моделировалось интенсивным перемешиванием воды. После неоднократного чередования 6-часовых периодов перемешивания и покоя активность животных полностью синхронизировалась. Этот метод позволил экспериментаторам сдвигать пики двигательной активности раков на любое время суток: после описанной выше предварительной подготовки активность наступала в ожидаемое время.

Действие приливов различной продолжительности изучалось на двух группах животных. В аквариуме, где содержались раки первой группы, вода утром перемешивалась в течение 120 минут, а через 12,4 часа — только 30 минут. Во второй группе утренний «прилив» длился 30, а вечерний — 120 минут. Через несколько суток подопытных раков поместили в постоянные условия, и, как и следовало ожидать, более высокие пики двигательной активности у

---

<sup>1</sup> Известен ряд примеров, когда суточный ритм регулируется в равной степени изменениями света и температуры, причем важно, чтобы эти факторы менялись синхронно.



обеих групп пришлось на период более продолжительного перемешивания.

Факторы, синхронизирующие приливный ритм, сдвигают пики активности, по-видимому, так же, как свет и температура, то есть в основе их кроется механизм, описываемый кривой фазового отклика.

Подробные исследования проводились и в связи с ритмом активности веслоногих раков. В аквариумы с принудительным двухчасовым перемешиванием, производимым дважды в сутки, поместили раков и стали наблюдать за сдвигом фаз в циклах их двигательной активности. Фазовые кривые получились двугорбыми, что соответствовало двум приливам в сутки и, следовательно, двум максимумам активности. Перемешивание, совпадавшее с пиком двигательной активности раков, не вызывало сдвига фазы. Перемешивание в период нарастания активности вызывало опережение по фазе, а в период, когда активность идет на убыль, — отставание по фазе. Как и в случае кривых фазового отклика на световой и температурный сигналы, было доказано, что поиск пищи совпадает с приливом, то есть с пиком механического воздействия. Если волны прибоя достигнут места обитания раков до наступления активности, то произойдет опе-

режение по фазе и на следующие сутки раки вылезут из норок раньше. Наоборот, если прилив наступит, когда раки уже начинают прятаться в норки, то в следующий раз они отправятся на поиски пищи позже.

Таким образом, механизм установления фазы здесь аналогичен тому, который был обнаружен при изучении действия света на фазу суточного ритма. Единственное отличие состоит в том, что кривая фазового отклика обладает не суточным — 24-часовым — периодом, а периодом, соответствующим приливному ритму, то есть 12,4-часовым периодом.

### Лунно-месячные циклы

Помимо процессов, связанных с приливным ритмом, существуют и такие процессы, которые приспособляются к более продолжительным циклам, также связанным с Лунной. Эти циклы, имеющие основополагающее значение для выбора времени размножения морских организмов, играют важную роль и в жизни других групп животных.

Определить наступление нужного момента лунного месяца организм может с помощью нескольких механизмов. Так, синхронизирующим



фактором вполне может быть лунный свет в полнолуние, разгоняющий ночную тьму. Обитатели морских вод и прибрежной зоны могут регулировать свои циклы по наступающим в новолуние и полнолуние сизигийным приливам. Не менее широкие возможности открывает взаимосвязь циркадных и циркаприливных ритмов: в течение каждого лунного месяца фазы этих двух ритмов совпадают дважды (по крайней мере в тех местах, где ежедневно бывают два прилива и два отлива). В более доступной форме это утверждение звучит так: в любое заданное время, например в 8 часов утра, прилив в течение лунного месяца происходит только два раза.

Проведенные до сих пор исследования не позволяют однозначно установить механизм синхронизации, и нет уверенности в том, что нужный момент времени во всех случаях определяется одинаково.

В качестве наиболее известного примера приспособления момента массового размножения к лунному циклу обычно приводят тихоокеанского палоло (*Eunice viridis*). Этот морской червь, светло-зеленого цвета, обитающий в лагунах коралловых атоллов в районе островов Самоа, достигает 40 сантиметров в длину и состоит в отдаленном родстве с дождевым червем. Живут палоло

в ими самими вырытых норках и ведут хищный образ жизни.

Весьма примечателен способ размножения палоло. Половые клетки, созревающие в задних сегментах тела червя, изменяют их форму. В брачную ночь задняя часть тела червя отделяется, всплывает к поверхности океана и, разрываясь, высвобождает яйца или сперму. Происходит оплодотворение.

Размножается палоло всегда в ноябре или декабре, когда Луна находится в третьей четверти. Поскольку червь съедобен, туземцы заранее вычисляют великий день и устраивают поистине всеобщее празднество. Ночью они всей деревней выходят в море и освещают факелами поверхность воды. Когда из глубины показываются готовые лопнуть от переполняющих их половых клеток половинки палоло, туземцы в огромных количествах вылавливают живой деликатес и доставляют его на берег. С ловом палоло приходится спешить, так как по прошествии 1–2 часов все яйца и сперма выходят в воду, после чего лов теряет смысл. Богатые белками, начиненные половыми клетками задние половинки палоло обычно едят сырыми или, завернув в пальмовые листья, поджаривают.

Аналогичный ритм размножения наблюдается и у атлантического, или флоридско-

го, палоло (*Eunice fucata*), достигающего в длину 70 сантиметров. Брачная ночь у этого палоло бывает всегда в третью четверть Луны – между 29 июня и 28 июля.

Несмотря на систематический отлов, избранный палоло способ размножения благоприятно сказывается на численности червя. Он обеспечивает синхронное испускание огромных количеств яиц и спермы, что делает весьма высокой вероятность оплодотворения. Кроме того, поскольку слияние половых клеток происходит на поверхности моря, потомство палоло расселяется по гораздо большей территории, чем в том случае, если бы размножение его происходило на дне. К сожалению, механизм, заставляющий задние части тела палоло одновременно всплывать на поверхность океана, не известен. Возможно, в основе его лежит взаимодействие годичного, лунно-месячного и суточного ритмов.

В размножении обитающей у берегов Калифорнии атерины-груниона (*Leuresthes tenuis*) приспособление к лунному циклу используется не только для обеспечения встреч самца и самки. Брачный период этой рыбки ежегодно наступает между мартом и июлем, когда самцы и самки собираются у берега по ночам после новолуния или полнолу-

ния незадолго до наступления сизигийных приливов. Приливные волны выносят их на влажный песок пляжа. Самка закапывается в песок на глубину до 5–8 сантиметров и откладывает икру, самец ее оплодотворяет, и с отливом они возвращаются в океан. Развитие оплодотворенных икринок продолжается ровно 14 суток, и очень важно, чтобы волны в это время не унесли их в океан. Но поскольку благодаря самкам будущее потомство закопано в песок в том месте, куда вода доходит только во время высокого (сизигийного) прилива, то вплоть до следующего высокого прилива вода туда не доходит. Через 14 дней наступает следующий сизигийный прилив, и вода уносит мальков груниона в море.

Для поиска партнеров и приспособления к внешним условиям выплод комара-звонца *Clunio* подчиняется особому ритму. Развившиеся комары выходят из куколок в вечерние

часы во время отлива, следующего за сизигийным приливом, который происходит с наступлением новолуния или полнолуния. Синхронность выплода имеет решающее значение: крылатые самцы помогают выйти из куколок бескрылым самкам и поэтому должны вылетать чуть раньше самок, но не слишком опережать своих будущих брачных партнеров.

Небезынтересно отметить, что у популяций, обитающих в различных местах, ритм выплода различен. В некоторых местах он происходит только один раз за лунный месяц, а в Нормандии и Северной Испании – два раза. У комаров, обитающих близ берегов Балтийского, Черного и Средиземного морей, где нет приливно-отливных колебаний, выплод не подчиняется лунному ритму. Как уже говорилось выше, точное время выплода регулируется генетическими факторами.

# Явления с годичным ритмом

И в мире растений, и в мире животных есть великое множество событий, происходящих всего один раз в году. В зонах умеренного климата такие события так или иначе связаны со сменой времен года, но аналогичные явления наблюдаются и в тропиках, расположенных недалеко от экватора, где эта смена не столь заметна. Ни для кого, хоть сколько-нибудь внимательно наблюдающего за жизнью окружающей его природы, не секрет, что разные растения цветут в разное время. К концу зимы, как только появляются первые проталинки, расцветает подснежник. Позднее, когда основательно потеплеет, луга покрываются желтыми цветками лютичного чистяка, весеннего адониса. Среди лета цветков самой различной окраски столько, что и не сосчитать, зато в конце осени прощальный привет теплому времени года шлют немногие растения: безвременник, борец, астры.

К чередованиям тепла и холода на протяжении года при-

способились не только растения, но и животные. С наступлением весны вылезают из своих нор и берлог те из них, кто провел зиму в спячке, возвращаются перелетные птицы. В жизни многих животных с весенними месяцами совпадает брачный период, а лето уходит на то, чтобы вырастить потомство. Наступление осени также знаменует большие перемены: перелетные птицы улетаю, животные, впадающие в зимнюю спячку, нагуливают жир перед тем, как залечь в берлоги и норы, грызуны делают запасы на зиму. У насекомых замедляются все жизненные процессы, они скрываются в укромных местах, чтобы там на стадии покоя перезимовать и дожждаться прихода весны.

## **Регуляция ритмичности: изменение продолжительности дня и ночи**

Каким образом происходит регуляция процессов с го-

дичным ритмом? Одни ученые полагали, что из внешних факторов, регулирующих, например, начало цветения растений, решающее значение имеет температура. На это можно было бы возразить, указав контрпример — ирис, который растет всю зиму в одинаково натопленной оранжерее, но расцветает только в мае. По мнению других, время наступления той или иной стадии репродуктивного цикла определяется скоростью созревания растения. На самом же деле скорость достижения той или иной стадии в развитии растения при всей своей важности не имеет решающего значения. Посеем семена одного и того же сорта сои тремя партиями: ранней весной, в июне и в июле. К осени соя весеннего посева вырастет гораздо выше, чем соя июньского и июльского посевов, но цветение во всех трех партиях наступит одновременно — в сентябре.

Много гипотез было выдвинуто и опровергнуто прежде, чем удалось доказать, что *решающим фактором в наступлении той или иной стадии в репродуктивном цикле у растений служит относительная продолжительность дня и ночи*. Это заключение весьма логично, поскольку относительная продолжительность дня и ночи — такой внешний фактор, который всегда изменяется в зависимости от времени года.

Вместе с тем он устойчивее температуры, например, которая может быть подвержена сильным колебаниям даже в последовательно взятые годы.

В начале нашего века американские исследователи В. Гарнер и Х. Аллард проводили опыты с новым сортом табака, растения которого достигали почти трехметровой высоты и давали очень много листьев, иногда до сотни. С экономической точки зрения такая культура обладала бы несомненными преимуществами, хотя у этого мутанта был один недостаток — в поле он не успевал давать семян до наступления морозов. Но если его перед первыми морозами высаживали в теплице, поздней осенью у него созревали семена. Значит, предположили ученые, цветение табака начинается не раньше, чем день станет достаточно коротким, а температура тут ни при чем, поскольку растения росли в теплице. Для проверки этого предположения несколько горшков с растениями в июле стали ежедневно помещать в полную темноту на 14 часов — с 18 часов вечера до 8 часов утра, а на остальные 10 часов выставлять на солнечный свет. Вскоре подопытные растения табака действительно зацвели.

После того как Гарнер и Аллард открыли у растений табака способность реагировать на продолжительность дня,

аналогичные эксперименты были проведены на многих других растениях. Продолжительность дня регулировали, либо используя искусственное освещение, либо накрывая растения светонепроницаемым пологом. Если искусственно созданное отношение свет — темнота соответствовало тому времени года, когда у растения в естественных условиях начинается цветение, оно зацвело. Итак, стало ясно, что решающим фактором для перехода растений в стадию цветения и плодоношения является продолжительность дня, и растения были поделены на растения длинного дня и растения короткого дня, а сам ответ организма на относительную продолжительность дня и ночи назвали фотопериодизмом. Скоро, однако, выяснилось, что некоторые растения не реагируют на продолжительность дня и цветут независимо от нее.

Первые опыты над животными, которые должны были дать ответ на этот вопрос, проводились так же в начале века. Еще в двадцатых годах канадский зоолог Роуэн провел наблюдения над зябликами, пойманными осенью в то время, когда они готовились к отлету на юг. Птицы содержались в клетках, но с помощью электрического освещения продолжительность дня была постепенно доведена до такой,

какой она бывает весной. Как показали вскрытия птиц (производившиеся с ноября по март), яичники их по уровню развития соответствовали периоду размножения, обычно наступающему весной. Зяблики, которых Роуэн выпустил из клетки, без колебаний полетели на север: по своему физиологическому состоянию птицы ощущали весну, когда наступает время возвращаться в родные места.

### **Организмы короткого и длинного дня**

Итак, изменение относительной продолжительности дня и ночи точно извещает организм (причем заранее) о предстоящей смене времен года, о наступлении холодов или тепла. Но, пожалуй, самое удивительное не в том, что в целях приспособления к условиям окружающей среды природа использует столь астрономически точную систему оповещения, а скорее в том, что растения и животные по своему образу жизни делятся на организмы короткого дня, длинного дня и, возможно, организмы смешанного типа.

Размножение растений и животных в средних широтах, как правило, подвержено фотопериодической регуляции. У растений это означает зависимость времени вступления в цветение и плодоноше-

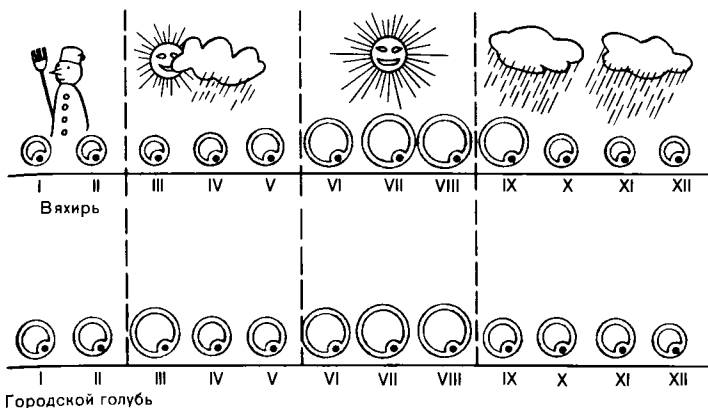
ние от относительной продолжительности дня и ночи. Самое важное для растения, чтобы хватило времени до полного созревания семян. Именно поэтому у растений столь часто встречается контроль длинным фотопериодом, позволяющим нежным цветкам появляться ранней весной, едва кончатся холода, но задерживающим наступление оплодотворения до благоприятной для развития семян продолжительности дня. Существуют и такие растения, у которых на вегетативное развитие уходит почти все весенне-летнее время, а для цветения остаются лишь короткие осенние дни. На время цветения влияет и то, сколько питательных веществ должно быть запасено в плоде и каким он должен быть по размеру.

У животных время появления на свет нового потомства определяется практически теми же факторами. У большинства птиц и млекопитающих половые железы достигают полного развития только к весне, когда они начинают вырабатывать половые клетки и гормоны. В остальное время года размеры семенников и яичников и их деятельность значительно сокращены. У птиц, например, вес семенников уменьшается в 500 раз. Гормоны, вырабатываемые половыми железами, развитие которых подчиняется фотопе-

риодическому контролю, стимулируют возникновение особого, брачного, поведения. По прошествии времени, характерного для каждого вида, из оплодотворенной яйцеклетки развивается новый организм, и на свет появляется потомство, способное поедать корм. До наступления холодов оно должно настолько окрепнуть, чтобы могло перезимовать. Если развитие у появившегося на свет организма происходит быстро, то на протяжении года нарождается несколько поколений.

Для появления потомства благоприятно то время, когда вокруг достаточное количество пищи. Так, яичники и семенники голубя вяхиря начинают созревать, когда продолжительность дня превышает 11 часов. Способности размножаться он, таким образом, достигает к маю. Сизому же голубю для созревания половых желез требуется день 9-часовой продолжительности, поэтому эта птица готова к спариванию 2–3 раза в год. Различие в сроках объясняется тем, что вяхирь питается главным образом зерном поздно созревающих злаков, а сизый голубь – имеющимися повсюду в изобилии семенами сорняков. Наш пример будет неполон, если не упомянуть о городском голубе. Его постоянно подкармливают друзья животных, но обильную пищу он





### Развитие яйцеклетки вяхиря.

находит для себя в уличных отбросах. У городского голубя нет предпочтительного времени размножения, хотя весной он спаривается несколько охотнее. С аналогичной ситуацией мы встречаемся и у других одомашненных животных.

За редким исключением у большей части млекопитающих регуляция фотопериодическая. Помимо более распространенных животных с длиннодневным типом фотопериодической реакции встречаются и животные с короткодневным типом. Причем преимуществом обладают те из них, у которых беременность длится долго, а потомство рождается от весеннего спаривания задолго до наступления осенних холодов. У коз и овец плод в Утробе матери развивается 5–6 месяцев, в то время как у оленей и косуль — до 9 месяцев и спаривание происходит

осенью или в конце лета. Увеличение половых органов и созревание половых клеток начинается с наступлением коротких дней.

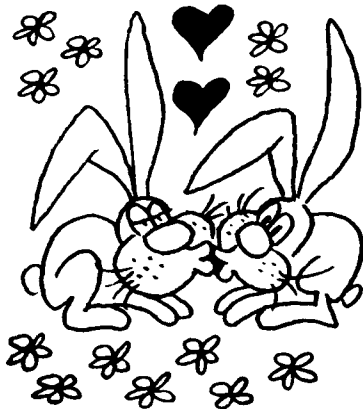
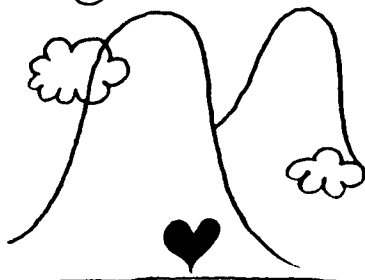
Весьма интересно размножение косуль. Спаривание у них происходит в июле–августе, но оплодотворенная яйцеклетка не внедряется в слизистую оболочку матки и не развивается. То и другое совершается лишь во второй половине декабря, и потомство появляется на свет в мае, когда вокруг в изобилии свежие зеленые растения. Часть тех косуль, которые в разгар брачного периода остались без партнера, спариваются в декабре, и развитие яйцеклетки у них начинается сразу же после оплодотворения: период беременности таких косуль сокращается на 3 месяца.

Замедленное внедрение яйцеклетки, как и спаривание,

FÜL



ВЕГНА



поддается фотопериодическому контролю. Время задержки можно сократить с помощью искусственного освещения. При разведении таких ценных пушных зверей, как норка, лесная куница, соболь, это дает большой экономический эффект. Помимо уже названных животных замедленное внедрение оплодотворенной яйцеклетки наблюдается у тюленей, медведей, барсука и некоторых сумчатых.

Изменяющаяся в зависимости от времени года продолжительность дня регулирует не только процессы размножения. Значительная часть обитающих в средней полосе птиц, спасаясь от зимних холодов, отправляется на юг. У перелетных птиц два дома. В тех местах, где они высидывают птенцов, дни длиннее и (по крайней мере на короткое время) много пищи. В тех же местах, где птицы зимуют, они находят убежище, позволяющее им благополучно пережить суровое время. Миграции птиц предполагают изрядный запас пищи, богатой питательными веществами. Затраты энергии при полете очень велики, времени же на подкормку в пути остается мало, поэтому возникает необходимость в запасании энергии впрок — отложении толстого слоя подкожного жира. Этот процесс, так же как и время отправления в путь,

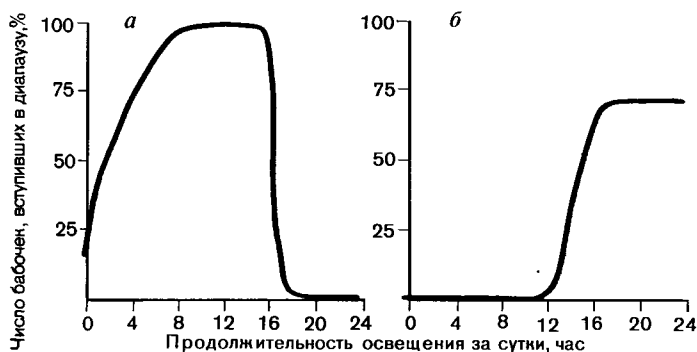
контролируется фотопериодом. У мелких птиц в выборе времени отправления в путь отчетливо просматривается связь с суточной активностью других животных, поэтому перелеты они совершают, как правило, по ночам. Большинство животных обычно ночью отдыхают, хотя среди них есть и такие, которые могут по ночам находиться в активной фазе и даже перемещаться на большие расстояния.

Растениям, а также тем животным, которые не могут летать или иным способом преодолевать большие расстояния, приходится переносить зимние холода другим образом. Весьма часто с наступлением холодов жизнедеятельность организмов понижается, что находит свое выражение у млекопитающих в спячке, у насекомых в диапаузе, а у много-

летних растений в так называемом периоде зимнего покоя.

Диапауза наступает у насекомых в зависимости от вида на различной стадии их развития (яйца, личинки или куколки); и в том, что каждый раз она приходится, по существу, на один и тот же период времени, решающая роль принадлежит фотопериодизму. Здесь мы имеем еще один пример регуляции коротким или длинным фотопериодом.

На первый взгляд может показаться удивительным, что длинные дни способны вызывать диапаузу. Но в случае с тутовым шелкопрядом все объясняется просто. Это насекомое зимует на стадии яйца, гусеницы вылупляются весной, а летом, пройдя через стадию куколки, превращаются в бабочку. Бабочки сразу же откладывают яйца. Для развития



Диапауза бабочек с короткодневным (а) и длиннодневным (б) типом фотопериодической реакции, вызванная с помощью искусственного увеличения продолжительности дня. Кривые показывают, сколько бабочек вступило в диапаузу на стадии яйца.

отложенных ими яиц вполне благоприятны более длинные летние дни. Развившиеся из этих яиц бабочки в свою очередь откладывают яйца, которые вступают в диапаузу и дожидаются следующей весны.

### **Механизм фотопериодической чувствительности**

Дальнейшее изучение явлений с фотопериодической регуляцией обнаружило немало новых не менее удивительных особенностей их протекания. Растения короткого и длинного дня поместили в условия короткого дня. Как и следовало ожидать, зацвели только растения короткого дня. Но если эти растения осветить ночью на короткое время, то у растений длинного дня начинается репродуктивное развитие, а у растений короткого дня — торможение. Иначе говоря, для развития растения существенна продолжительность не светлого, а темного периода суток. Поэтому растения длинного дня правильнее было бы называть растениями короткой ночи, а растения короткого дня — растениями длинной ночи. Таким образом, растения (а согласно последним наблюдениям, и животные), у которых проявляется фотопериодизм, «изменяют» продолжитель-

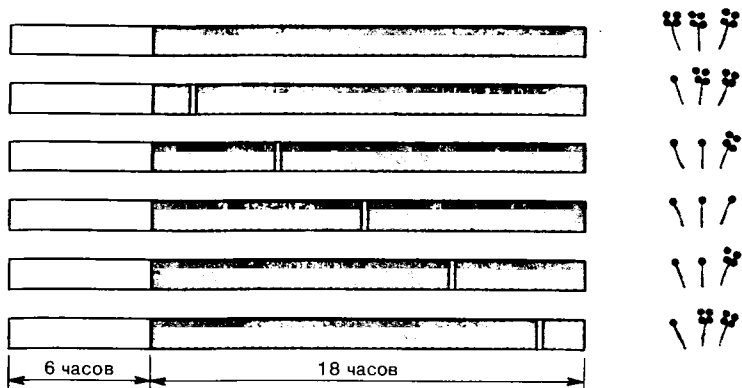
ность ночи. Если продолжительность ночи превосходит некоторый критический предел или становится короче его, то в организме начинаются физиологические изменения, приводящие к началу цветения растений, развитию половых клеток и прочих явлений.

Измерение времени в организме может осуществляться двумя путями. Первый, по видимому, сводится к тому, что наступление темноты запускает какой-то процесс, действующий по принципу *песочных часов*. Успеет ли весь песок из верхней половины пересыпаться в нижнюю к началу светлого периода, зависит от того, когда часы пущены в ход. Перевернуть песочные часы, то есть завести их снова, организм успевает к концу светлого периода, то есть к наступлению темноты. Второй путь зависит от периодических изменений с 24-часовым циклом, которым подвержена чувствительность к фотопериодическому сигналу<sup>1</sup>.

**24-часовой цикл фотопериодической чувствительности.** В какую часть ночи освещение оказывает наибольшее влияние на организм? Чтобы отве-

---

<sup>1</sup> Согласно современным представлениям, и в том и в другом случае механизм фотопериодической реакции может быть одним и тем же.



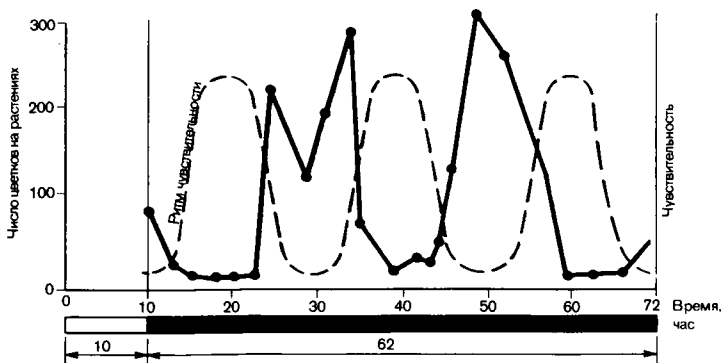
Торможение цветения растения короткого дня каланхоэ (отношение свет – темнота 6 : 18) ночным 15-секундным импульсом света. Число зацветших растений при импульсе, поданном среди ночи, минимально.

тить на этот вопрос, экспериментаторы задавали растениям и животным 24-часовой цикл с искусственным отношением свет – темнота, разбив подопытные организмы на группы и каждую группу освещая коротким световым импульсом в различное время ночи.

Одно из таких наблюдений проводилось над растением короткого дня каланхоэ. Растения, содержащиеся в условиях цикла с отношением свет – темнота 6 : 18, в темный период освещались в различное время короткими световыми импульсами (продолжительность каждого импульса составляла 15 секунд). Максимальное торможение цветения наступало в том случае, когда световой импульс подавался в середине темного периода. По

существо, аналогичные результаты были получены и когда самцов белоголовой овсянки в течение двух часов посреди темного периода облучали световыми импульсами. Развитие семенников происходит при регуляции длинным фотопериодом: половые железы растут быстрее всего, если световой импульс приходится на середину ночи, через 8 часов после наступления темноты.

Следующее наблюдение показывает, что измерение времени происходит на основе 24-часового ритма фотопериодической чувствительности. Каланхоэ помещали в искусственные условия, при которых после 10 часов непрерывного освещения на 62 часа наступала темнота. В различные моменты темного периода подавались свето-



Группа из 21 растения каланхоэ, выращенных при соотношении свет — темнота 10 : 62. Точками отмечены моменты, когда какая-то из групп получила двухсекундный импульс света. Число цветков, образовавшихся на растениях, несмотря на тормозящее действие светового импульса, свидетельствует о 24-часовом ритме фотопериодической чувствительности.

вые импульсы продолжительностью в 2 секунды. В результате оказалось, что чувствительность к световому импульсу, вызывающему торможение цветения, подчиняется 24-часовому ритму. Аналогичный 24-часовой цикл был обнаружен и у других организмов.

Итак, у подавляющего большинства организмов, обладающих фотопериодизмом, наблюдается 24-часовой ритм фотопериодической чувствительности. Чтобы вызвать цветение, развитие семенников и т. д. у организмов длинного дня, световой импульс должен быть подан в тот период цикла, когда чувствительность особенно велика. Это условие в зависимости от продолжительности критического интервала времени

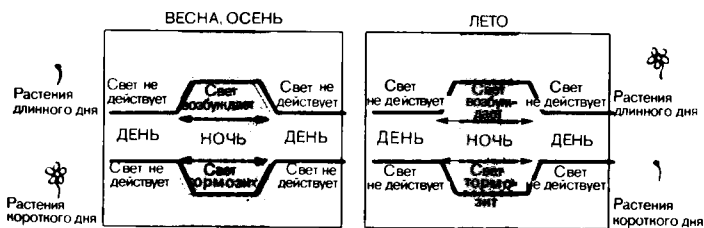
в природе выполняется только летом и, возможно, весной. У организмов короткого дня световой импульс, поступивший в чувствительный период цикла, тормозит начало цветения или наступление диапаузы. Следовательно, когда дни становятся короче, торможение прекращается и в жизненном цикле организма происходят соответствующие изменения.

**Принцип песочных часов.** Несмотря на то что у большинства организмов устанавливается 24-часовой ритм фотопериодической чувствительности, встречаются и исключения из этого правила. Например, тля *Megoura* явно измеряет продолжительность ночи по принципу песочных часов. Цикл развития у тлей очень

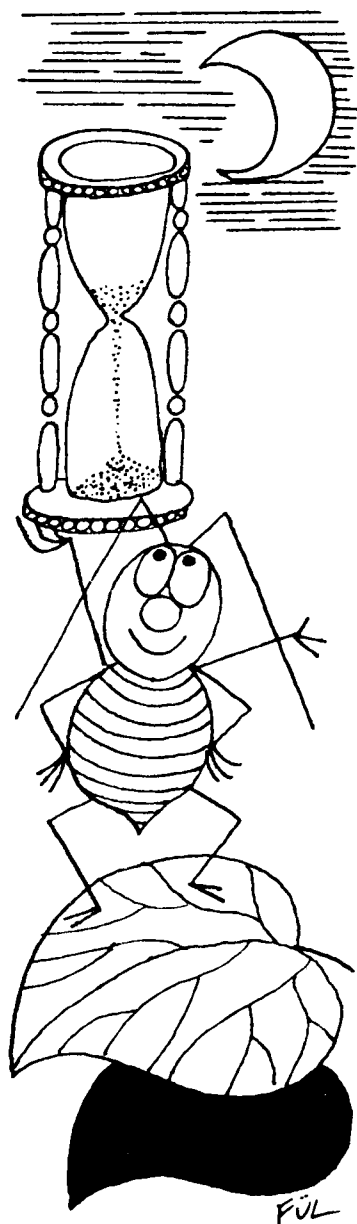
сложен. Летом у бескрылых самок без оплодотворения, то есть девственным, или партеногенетическим, путем, рождаются личинки, которые быстро развиваются до стадии взрослой особи и тем же способом приносят новое потомство. Размножаются тли необычайно быстро. Когда дни становятся короче, рождаются личинки, развившиеся из них половозрелые самцы и самки размножаются половым путем и откладывают яйца, которые остаются на зиму. Весной из них выводятся новые тли, и садоводы начинают защищать от них плодовые деревья. Каким будет потомство – размножающимся партеногенетически или способным откладывать яйца, определяется на ранней стадии эмбрионального развития степенью зрелости материнского организма, на которое решающее влияние оказывает относительная продолжительность дня и ночи.

При отношении свет – темнота 8 : 64 рождаются только тли, откладывающие яйца. Нарушая время от времени темный период включением света, можно добиться появления тлей, размножающихся партеногенетическим путем. Однако в отличие от предыдущих примеров воздействие света оказывается эффективным лишь при условии, если он включается через 8 часов после наступления темноты. «Песочные часы» переворачиваются только после очередной смены свет – темнота.

Измерение времени живыми организмами по принципу песочных часов описано и в некоторых других случаях. Однако в большинстве наблюдений, как выяснилось впоследствии, при неправильном выборе условий возникал ритм, самым прямым образом связанный с 24-часовым ритмом светочувствительности, он-то и создавал видимость песочных часов.



Объяснение регуляции явлений коротким и длинным фотопериодом на основе 24-часового ритма фотопериодической чувствительности. Воздействие светового импульса в период высокой фотопериодической чувствительности может ускорить у растений длинного дня начало цветения и затормозить его у растений короткого дня.



**Рефрактерный период.** Говоря о периоде размножения, мы ни словом не упомянули о том, что спаривание не может происходить бесконечно. Действительно, если бы у организмов длинного дня функциональное состояние половых органов, необходимое для эффективного оплодотворения, наступало при благоприятном отношении свет-темнота в период с весны до осени и в любой момент происходило бы спаривание, то появившееся на свет потомство не могло бы найти пищу в количествах, необходимых для его нормального развития. Поэтому после того, как период размножения заканчивается, половые органы регрессируют, и (по пока еще неизвестным причинам) наступает *рефрактерный период*, длящийся от недели до 4 месяцев, во время которого никаким освещением нельзя вызвать развития половых клеток. А по окончании рефрактерного периода относительная продолжительность дня и ночи изменяется настолько, что уже не позволяет созреть половым клеткам.

#### **Связь с другими суточными ритмами**

Каким образом 24-часовой ритм фотопериодической чувствительности связан с остальными суточными ритмами? Управляют ли всеми су-

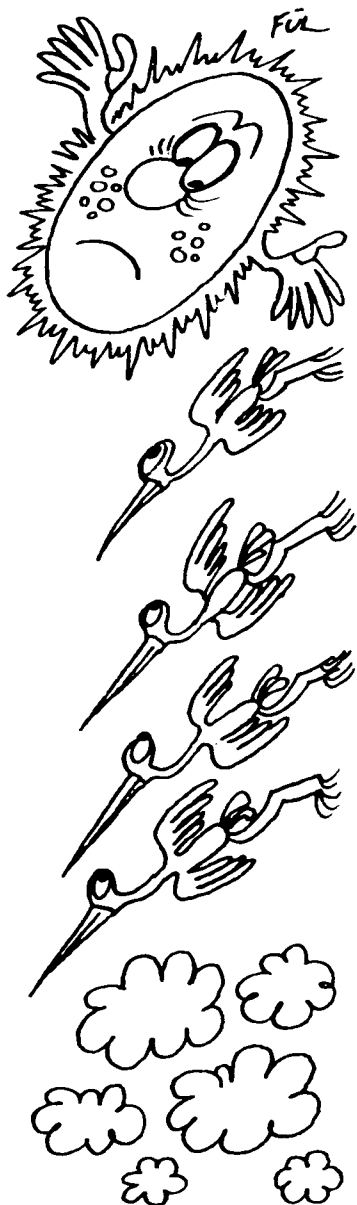


точными ритмами различные часы или они связаны независимыми «передачами» с одними и теми же центральными часами? Соотношения фаз не позволяют нам сделать какие-либо выводы о существовании центральных часов, управляющих всеми процессами. Например, у взрослых *Gonyaulax* наблюдаются 4 различных суточных ритма, возможно связанных с одними часами. Тем не менее фазы этих ритмов не совпадают. Сомнения разрешились бы, если бы удалось показать, что какое-нибудь внешнее воздействие в одинаковой мере изменяет периоды или фазы хотя бы двух ритмов.

Колеусы (декоративные растения из семейства губоцветных) разбили на 7 групп, которые содержали при различных ритмах свет-темнота. Отношения свет-темнота изменялись в пределах от 2 : 22 до 14 : 10, каждую группу освещали на 2 часа дольше, чем предыдущую. Наблюдая за движениями растений в период «сна», экспериментаторы установили, что в первых пяти группах листья достигали максимально расслабленного состояния через 5 часов после начала темного периода, а в двух последних группах — только через 3 часа после того, как гасили свет. Таким образом, сдвиг фаз между двумя подгруппами при

избранной экспериментаторами схеме освещения составил 2 часа. В трех других группах колеусы содержались при соотношениях свет-темнота 4 : 20, 8 : 16 и 12 : 12. Цель опыта состояла в том, чтобы определить, в какой момент воздействие светового импульса на эти растения короткого дня вызывает максимальное торможение цветения. Как показали наблюдения, в первых двух группах максимальный эффект достигался через 10 часов после наступления темноты, а в последней — на 2 часа раньше. Следовательно, при выбранной схеме освещения суточные ритмы движения «сна» и фотопериодической чувствительности претерпели одинаковые по величине и направлению сдвиги фазы, и весьма вероятно, что регуляция обоих ритмов осуществляется одними и теми же часами.

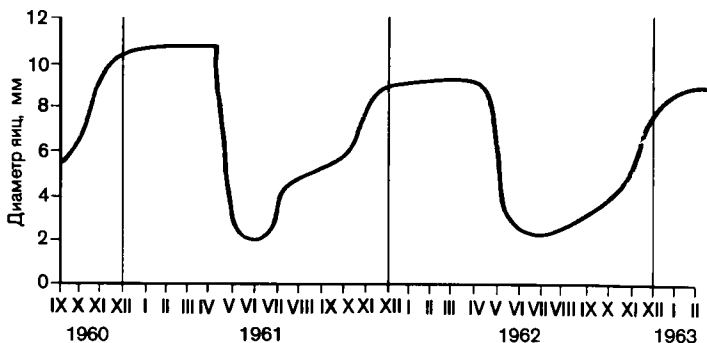
У высших животных, как уже говорилось, почти наверное существуют центральные часы, которые через нервную и гормональную системы согласуют ход внутренних часов различных органов и тканей. Так, в основе тормозящего действия, оказываемого на половые органы гормонами эпифиза, может лежать фотопериодизм, поскольку известно, что в результате данной режимом освещения информации уменьшается выделение гормонов. Длинные дни снимают



торможение с половых органов, и те начинают развиваться, вырабатывать половые клетки и гормоны. Разумеется, в действительности все обстоит гораздо сложнее, поскольку, с одной стороны, фотопериодической регуляции поддается не только деятельность половых органов, а с другой — у некоторых видов животных наблюдается регуляция не длинным, а коротким фотопериодом.

### Годичные ритмы внутренней регуляции

Механизм приспособления к годичному интервалу времени настолько прост и логичен, что вряд ли можно было бы его придумать лучше. Будучи приспособленным к определенной длине светового дня, организм может легко выделить этот момент времени в течение года. Следовательно, организм может заранее ощутить ожидаемые сезонные изменения погоды и приспособиться к ним. Кроме того, организм может использовать для измерения времени часы с 24-часовым циклом, полезные для других целей, поэтому необходимость в полностью независимом механизме отпадает. Существуют, однако, и такие организмы, которые не могут использовать наглядный и простой механизм фотопериодизма, и такие, у которых, несмотря на



Ритм развития семенников у красноклювых ткачиков (*Quelea quelea*), в течение двух с половиной лет содержавшихся в условиях с циклом свет – темнота 12 : 12.

то, что они обладают фотопериодической реакцией, наиболее четко проявляется их внутренний годичный ритм.

В экваториальных и приполярных областях нет столь заметных изменений продолжительности дня, как в умеренных широтах. Тем не менее у большинства тропических растений наблюдается 12-месячный жизненный цикл. Происходит ли регуляция этого ритма и может ли он исчезнуть под действием, например, каких-то других внешних факторов, неизвестно.

В областях, расположенных вблизи экватора, обитает красноклювый ткачик (*Quelea quelea*). Миллионные стаи этой птицы находят обильную пищу в африканской саванне, простирающейся к югу от Сахары. На-

блюдения производились на протяжении двух с половиной лет над птицами, содержавшимися в условиях с ритмом свет – темнота 12 : 12. Изучалось развитие семенников. Ежемесячно у отловленных ткачиков через небольшой разрез с левой стороны измерялись размеры левого семенника. Оказалось, что размеры половых желез ткачика колеблются с периодом около 12 месяцев. Регуляция этих колебаний заведомо осуществляется внутренними часами, так как фотопериодическая информация отсутствовала.

У перевезенных в тропики растений зоны умеренного климата сохраняется годичный ритм цветения, плодоношения, опадания листьев и покоя. Однако период этого ритма не равен в точности 12 месяцам, у некоторых особей

встречаются отклонения. Возможно, эти явления основаны на работе часов с годичным периодом.

Не может использовать информацию, содержащуюся в продолжительности дня, ни одна из перелетных птиц, пересекающих по пути к местам зимовки или гнездования экватор: отношения продолжительности дня и ночи в Северном и Южном полушариях противоположны. Тонкоклювый буревестник (*Puffinus tenuirostris*) – представитель отряда крупных морских птиц – имеет в длину всего 33 сантиметра, великолепно летает. Гнездится на южном побережье Австралии. В апреле огромными стаями пускается в путь с тем, чтобы, описав гигантскую петлю, вернуться назад к своим гнездовьям. Первый пункт назначения – прибрежные воды Японии и Камчатки. Затем, перелетев Тихий океан, тонкоклювый буревестник достигает Северной Америки; от американских берегов он поворачивает на юг, потом снова летит через океан и в сентябре возвращается в Австралию. Здесь птицы устраивают гнезда, выбирая для этого подходящую ямку, и исполняют брачный танец. Подавляющее большинство самок (85%) откладывают 24-го, 25-го или 26-го ноября по одному яйцу. Как показали четырехлетние наблюдения за

мечеными птицами, они из года в год 24-го ноября откладывали по одному яйцу. У содержащихся в неволе при искусственных ритмах освещения тонкоклювых буревестников половозрелость наступала одновременно с их собратьями на воле. Это подтверждает предположение о существовании внутренних очень точно идущих биологических часов с годичным циклом.

У всех растений и животных, над которыми проводились многолетние наблюдения при постоянных и естественных условиях, соответствующих средней полосе, были установлены 12-месячные циклы с фотопериодической регуляцией. Во многих случаях удалось обнаружить остаточные годичные ритмы. У белок, родившихся в лаборатории и выросших при постоянных условиях, годичная активность сохранялась и в темноте при температуре +3°C. Циркагодичный ритм наблюдался до конца трехлетних наблюдений; период, соответствовавший в условиях эксперимента зимнему покою, был четко выражен.

Таким образом, подводя итоги, можно утверждать, что у организмов, обитающих в зонах умеренного и холодного климата, годичные ритмы обычно регулируются сдвигом в относительной продолжительности дня и ночи.

Восприятие изменений в большинстве случаев осуществляется с помощью фотопериодической чувствительности с 24-часовым ритмом, возникающим на основе биологических часов. Кроме того, у неко-

торых видов, в основном у млекопитающих, развивается эндогенный годичный ритм, который при постоянных условиях переходит в остаточный годичный ритм.

## Ориентация с помощью часов

Туристам хорошо известно, что по Солнцу и наручным часам нетрудно определить, где находится север. Для этого часы поворачивают так, чтобы часовая стрелка указывала на Солнце, тогда биссектриса угла между часовой стрелкой и 12 часами<sup>1</sup> даст направление на север. Объясняется такой способ определения стран света просто. Земля совершает за 24 часа оборот вокруг своей оси; значит, Солнце (имеется в виду его видимое движение по небосводу) за то же время описывает угол в  $360^\circ$ , то есть каждый час проходит дугу в  $15^\circ$ . В Северном полушарии Солнце в 12 часов стоит точно на юге, в Южном — на севере. Часовая стрелка наручных часов вращается вдвое быстрее Солнца, то есть проходит за час угол в  $30^\circ$ , двигаясь в том же направлении, что и Солнце.

Следовательно, угол между направлением из центра циферблата на 12 часов и положением часовой стрелки вдвое больше угла между направлениями на Солнце и на юг; следовательно, биссектриса этого угла указывает направление на север.

В первой главе мы убедились, что в мире растений встречаются своего рода наручные биологические часы самых различных конструкций с 24-часовым циклом. Не удивительно поэтому, что и у животных в процессе филогенетического развития вырабатывалась способность *ориентироваться по Солнцу*. Направления на различные «пункты назначения» животные отсчитывают по отношению к направлению на Солнце. Часы необходимы им для того, чтобы можно было внести поправку на движение Солнца.

По тому же принципу направление север—юг можно установить и по направлению на Луну, однако для этого тре-

---

<sup>1</sup> На территории СССР по зимнему декретному времени — 1 часом дня, а по летнему — 2 часами дня.

буются часы, ход которых согласован с движением Луны. У некоторых животных, как мы уже видели, такие лунные «хронометры» действительно имеются, они используют в качестве опорной линии направление на Луну. Однако *ориентация по Луне* имеет гораздо меньшее значение, потому что пригодна только в ночные часы либо когда Луна видна на небосводе.

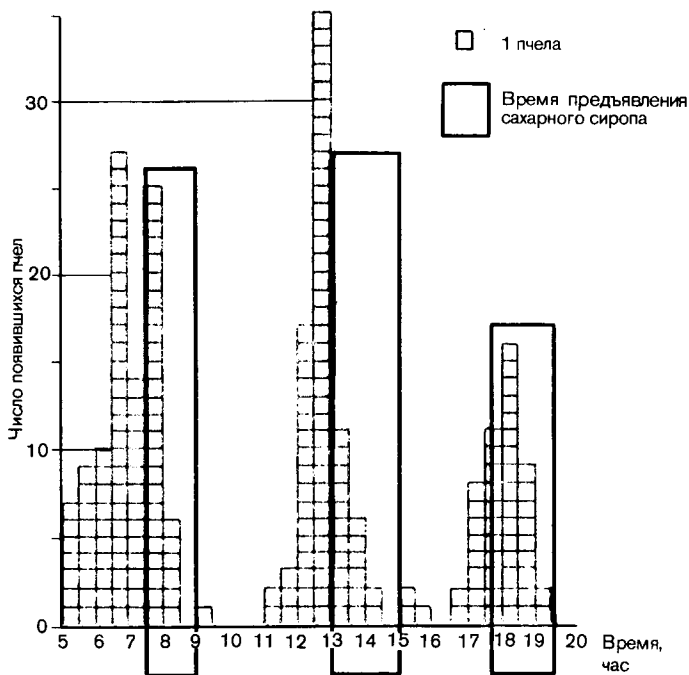
### **Как пчелы ориентируются во времени и в пространстве**

Цветки различных растений раскрываются в определенные часы, поэтому узнавать время медоносные пчелы могут по «цветочным часам». Вопрос о времени для пчел далеко не праздный и имеет практическое значение: пчела может собирать цветочную пыльцу и нектар только в том случае, если лепестки цветка раскрылись. Чтобы пчела могла работать эффективно, ей необходимо уметь каким-то образом определять направление на место, богатое нектаром, и время дня, наиболее благоприятное для сбора пыльцы и нектара. О последней функции часто упоминают как о «чувстве времени» у пчел. Строго говоря, чувство времени не имеет непосредственного отношения к проблеме ориентации, но способность ориентироваться

в пространстве так тесно связана со способностью ориентироваться во времени, что их разумно рассматривать вместе.

На чувство времени у пчел впервые обратил внимание в начале века один швейцарский врач, которому каждое утро досаждали пчелы, собиравшиеся на повидле, подаваемом к завтраку в саду на террасе. Прилетели они в положенное время, и когда завтрак был накрыт в доме. После этого врач ежедневно регистрировал появление пчел на террасе, независимо от того, было там соблазнительно пахнущее повидло или что-нибудь менее интересное для них.

Первые опыты были проведены в конце двадцатых годов. Спинки пчел, чтобы их можно было различать, помечались разной краской. В кормушке, выставленной неподалеку от улья, пчелам ежедневно с 10 до 12 часов предлагали сахарный сироп. Сначала пчелы по многу раз на день возвращались к кормушке, но через 6–8 дней усвоили, что прилетать за взятком имеет смысл только в определенное время – в те два часа, когда в кормушке бывает сахарный сироп. Последующие наблюдения показали, что, где бы ни находилась кормушка и в какое бы время дня в нее ни наливали сахарный сироп, пчелы обучаются прилетать в нужное место по задан-



Чувство времени у пчел. В трех различных местах в три различные промежутка времени (обозначенные черными рамками) для пчел выставляли сахарный сироп. Чтобы запомнить время предъявления пищи, пчелам требовалось от 6 до 8 дней.

ному расписанию не более чем за 9 дней. Предполагается, что время предъявления сиропа отличается одно от другого не меньше чем на 20 минут. После того как сахарный сироп убирали, пчелы еще несколько дней продолжали прилетать к кормушке в это же самое время, хлопотливо заглядывали во все уголки и, обескураженные, улетали.

Такое поведение пчел также связано с биологическими ча-

сами. Если поместить пчел в лаборатории при постоянных условиях, то время посещения кормушки от этого не изменится. Не влияет на чувство времени и повышение или понижение температуры: в диапазоне температур от 18 до 35°C они определяют время практически с одинаковой точностью.

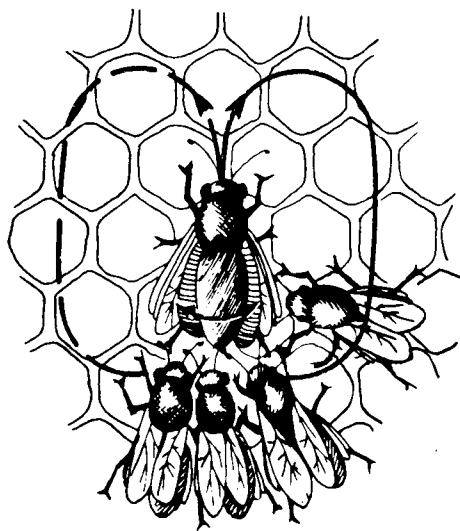
Как и в случае с другими биологическими ритмами, были предприняты попытки про-



верить, не объясняется ли чувство времени у насекомых действием ритмических изменений некоторого доселе неизвестного, очень тонкого, неустранимого при постоянных условиях в лаборатории фактора окружающей среды (магнитного или электрического поля, какого-нибудь излучения и т. п.). Но и в недрах Альп, в штольнях соляных копей на глубине 180 метров от поверхности земли, пчелы безошибочно узнавали, что наступил час кормления.

С той же целью в Нью-Йорке и Париже оборудовали

две совершенно одинаковые лаборатории. Сначала пчел обучили прилетать за кормом в определенное время в Париже, затем самолетом их отправили в Нью-Йорк. В обеих лабораториях пчелы содержались в одних и тех же условиях. Прибыв на новое место, пчелы отправились к кормушке по парижскому времени, ровно через 24 часа после последней подкормки в Париже. Поскольку разница во времени между Парижем и Нью-Йорком составляет 5 часов, то предполагаемое воздействие гипотетического внешнего



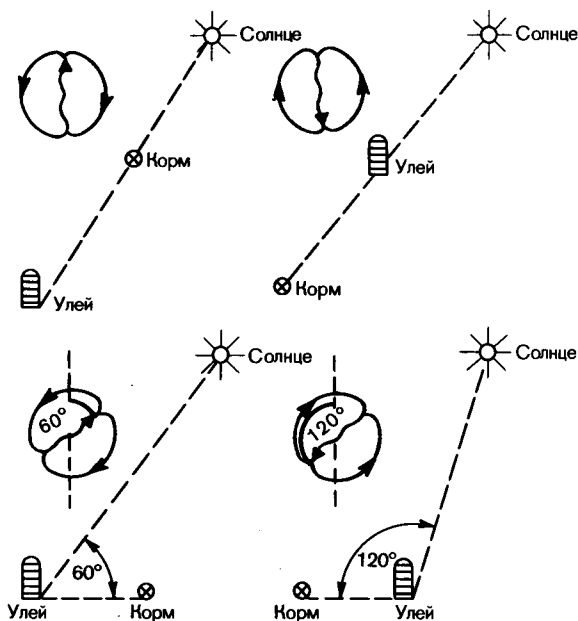
Влияющий танец рабочей пчелы. Нашедшая корм пчела-разведчица исполняет на вертикальных сотах танец, описывая фигуру, напоминающую по форме сплюснутую восьмерку. Детали исполняемого танца сообщают остальным пчелам, собравшимся вокруг и наблюдающим за танцующей пчелой, необходимую информацию о направлении на корм, расстоянии до него и обилии его запасов (по Карлу фон Фришу).

фактора должно было бы изменить со сдвигом на 5 часов время вылета пчел. Но этого не случилось.

И снова возникает вопрос: каким образом пчелы находят то место, где установлена кормушка? Оказывается, для передачи необходимой информации пчелы пользуются необычайно интересным языком знаков, или языком танца. За это открытие немецкий физиолог Карл фон Фриш получил в 1973 году Нобелевскую премию. Экспериментаторы рас-

ставили вокруг улья 8 кормушек и в одну из них поместили сахарный сироп. В стенке улья прорезали небольшое отверстие, закрыли его стеклом и принялись наблюдать за поведением пчел.

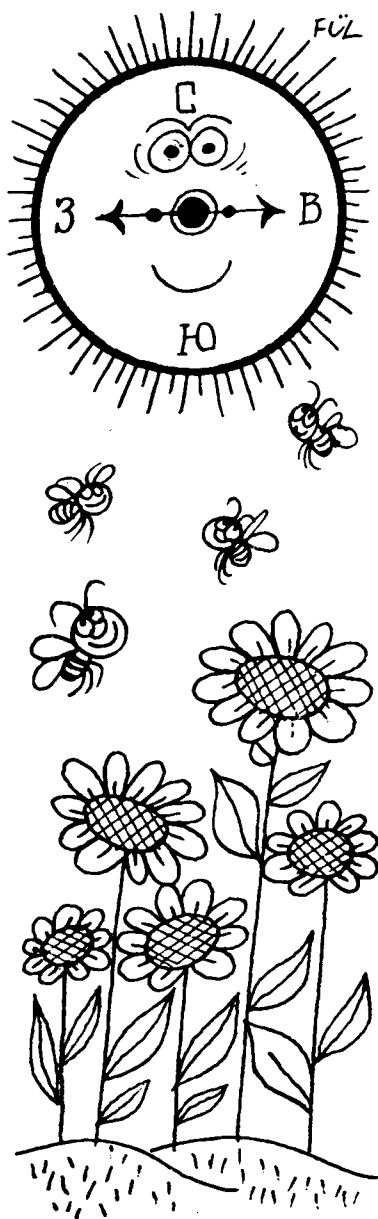
Рабочая пчела, отправившаяся на поиски пищи, наталкивается на кормушку с сахарным сиропом и тут же возвращается в улей. Там она «рассказывает» о своем открытии другим пчелам при помощи танца, который она исполняет на вертикальных сотах,



Направление на источник пищи указывает ось «восьмерки» (прямая линия между петлями), выписываемой пчелой во время танца. Вертикаль на сотах всегда соответствует направлению на Солнце. Угол между осью фигуры и вертикалью равен углу между направлением на источник пищи и направлением на Солнце (по Карлу фон Фришу).

описывая фигуру, напоминающую по форме сплюсненную восьмерку. Пчелы, сгрудившись, озабоченно наблюдают за «па» танцующей разведчицы. Из этого танца пчелы получают всю необходимую информацию: в каком направлении обнаружен корм, на каком расстоянии от улья и много ли его. Вертикаль на сотах всегда соответствует направлению на Солнце. Угол между осью «восьмерки» и вертикалью равен углу, заключенному между направлением на Солнце и направлением, в котором находится корм. Поскольку Солнце каждый час перемещается по небосводу на  $15^\circ$ , ось «восьмерки» также должна поворачиваться относительно вертикали, иначе счастливая открывательница запасов корма введет своих соседей по улью в заблуждение. Для того, кто обладает биологическими часами, это не проблема. Если после возвращения пчелы-разведчицы закупорить выход из улья и в течение трех часов не давать рабочим пчелам вылетать за кормом, то можно заметить, что угол между осью «восьмерки», описываемой в танце разведчицы, и вертикалью постепенно изменяется — со скоростью  $15^\circ$  в час. Как только улей снова откроют, рабочие пчелы полетят за кормом в правильном направлении.

Был проведен и обратный



опыт: пчелу, обнаружившую корм, ловили у кормушки или на цветке и помещали на 3 часа в темную коробку. Выпущенная на волю, пчела тотчас полетела в правильном направлении и вернулась в улей, то есть ее биологические часы внесли в угол, образуемый направлениями на Солнце и на улей, поправку на видимое движение Солнца.

Способность пчел определять направление на Солнце не врожденная, а приобретенная, и обучаются ей пчелы постепенно на протяжении многих дней. Сначала пчела запоминает угол между направлениями на источник пищи и на Солнце и только позднее обучается с помощью биологических часов вносить поправку на видимое движение Солнца.

Гораздо дольше длится обучение у муравьев, также ориентирующихся по Солнцу, например у лесных рыжих муравьев. Летом и осенью муравьи легко учитывают видимое движение Солнца, а весной еще не успевают этому научиться.

Возможно, кто-нибудь подумает, будто пчелы могут ориентироваться только в ясную, солнечную погоду, а хмурое небо мешает им не меньше, чем неопытным туристам. Такое мнение неверно: пчелы легко ориентируются и в пасмурную погоду, когда затянутое тучами небо освещено не-

одинаково или где-нибудь в просвете виднеется клочок чистого неба. Объясняется это тем, что пчелы, как и многие другие беспозвоночные, воспринимают колебания плоскости поляризации света, положение которой зависит от того, где находится Солнце.

Таким образом, пчелы обладают связанным с биологическими часами тонким механизмом, позволяющим им находить поля цветущих медоносов и возвращаться в улей. Различие между нашим способом ориентации по наручным часам и способом ориентации пчел по Солнцу состоит в том, что мы можем определить только направление север-юг и, уже зная его, решить, в каком направлении нам следует двигаться, в то время как стрелка пчелиной «буссоли» всегда указывает насекомым направление полета. Пчелы могут изменить это направление, если в новом месте обнаружится большее поле цветущих медоносов.

### **Возвращение к месту обитания**

Многочисленные беспозвоночные, обитающие в прибрежных водах, всегда выбирают оптимальное направление для своих миграций. Дорогу домой они находят с помощью компаса, который

устроен проще пчелиной буссоли и всегда указывает на берег.

Один из пауков-волков (*Arctosa perita*) обитает по берегам озер и рек. Расположенные в три поперечных ряда его восемь глаз, подобно глазам пчелы и некоторых муравьев, обладают способностью воспринимать плоскость поляризации света, что позволяет их обладателю находить дорогу домой, даже если Солнце непосредственно не видно. Брошенный в воду паук тотчас устремляется по кратчайшему пути к берегу. Если же его перенести на другой берег и бросить в воду, то несчастный паук вскоре скроется из виду, так как и там пойдет по поверхности воды в прежнем направлении — к противоположному берегу.

В том, что паук ориентируется по Солнцу, убедиться нетрудно: если его отгородить от Солнца непрозрачным экраном и направить на него с другой стороны солнечные лучи, отраженные от зеркала, то он пойдет в направлении, отличном от прежнего. Поместив паука в условия с искусственным ритмом освещения, можно изменить поправку на видимое движение Солнца, вносимую его биологическими часами.

Своеобразно ориентируется песчаная, или береговая, блоха (*Talitrus saltator*). Этот небольшой рачок-бокоплав во

множестве встречается на берегах Италии. Рачок зарывается в песок в той части берега, которая расположена выше приливной зоны, и выходит из своего убежища только во второй половине дня. Крохотный землепроходец пускается в путь, который может оказаться весьма неблизким. Несмотря на то что его размеры едва достигают 1 сантиметра, рачок, поедая выброшенные на берег или принесенные потоками дождевой воды остатки растений и мелких животных, успевает обойти примерно 100 метров. Незадолго до восхода Солнца рачок, очень чувствительный к пересыханию, должен вернуться назад, чтобы снова зарыться в песок. Дорогу домой он находит по направлению на Солнце, а когда Солнца не видно, по направлению на Луну. Рачки, обитающие на западном берегу Адриатического моря, спасаясь от воды, двигаются на запад, а если их насильно увезти в глубь суши — на восток. Рачки, живущие на восточном берегу Адриатического моря, в аналогичных ситуациях движутся в противоположную сторону. Если рачков, обитающих где-нибудь на восточном берегу, перенести на западный берег, то при выборе направления, в котором им надлежит спастись бегством, они часто ошибаются... При постоянных условиях у рачков выбор на-

правления изменялся в циркадном ритме. Для выяснения возможного влияния каких-то чрезвычайно тонких геофизических факторов партию рачков, содержащихся при постоянных условиях, перевезли из Италии в Аргентину. Выбор направления бегства показал, что внутренние часы рачков по-прежнему показывали среднеевропейское время.

Маленький бокоплав, о котором идет речь, умеет находить дорогу назад, к морскому берегу, по Луне. Если группу рачков накрыть выпуклым стеклом так, чтобы они ничего, кроме неба, не видели, то они соберутся у того края стеклянного колпака, который ближе к морю. Движение Луны по небу не сказывается на выборе рачками правильного направления. Их безошибочный выбор направления объясняется тем, что они вносят поправку на движение Луны, то есть используют для измерения времени не только 24-часовой, но и 24,8-часовой цикл. Заменив Луну электрическим светом, экспериментаторы обнаружили, что рачки определяют направление к морю именно по светлomu диску нашего небесного спутника. Рачки, выдерживаемые в течение двух недель при постоянных условиях, продолжали ориентироваться по Луне..

Реакция возвращения на прежнее место у песчаной бло-

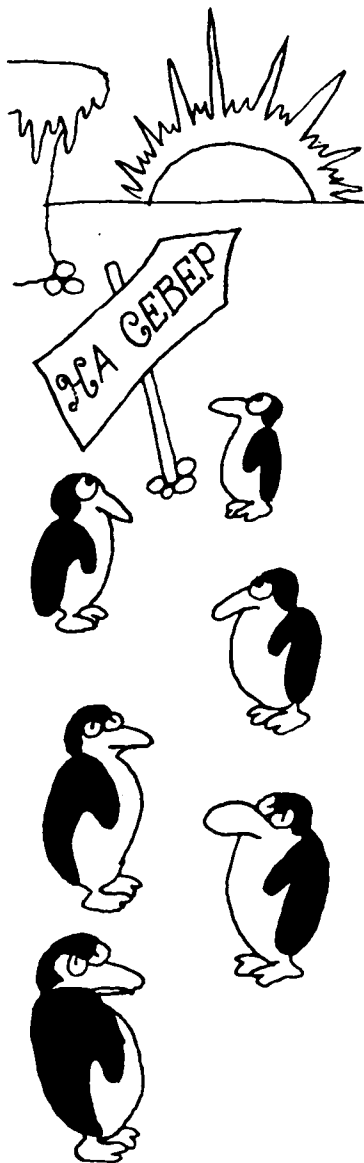
хи более жесткая, чем у пчел и муравьев, у которых важную роль в сборе пищи играет способность гибко изменять направление поисков. Поскольку место сбора пыльцы и нектара изменяется изо дня в день, пчелы и муравьи в конце концов запоминают приметы окружающей их жилище местности, что позволяет им возвращаться к нему с любой стороны. Не удивительно поэтому, что в случае пчел и муравьев речь идет о приобретенной способности ориентироваться, а в случае песчаной блохи — о наследственной способности выбирать направление бегства. Этот вывод подтверждается тем, что рачки, доставленные с восточного берега на западный, пускаются в бегство в ошибочном направлении — не к морю, а в глубь суши.

Нами также были проведены наблюдения, в которых способность песчаной блохи ориентироваться подвергалась более суровой проверке. В эксперименте участвовали 3 группы песчаных блох, обитавших на участках берега, омывавшихся морем с разных сторон света. Потомство всех трех групп рачков сразу после появления на свет изолировали и выращивали при постоянных условиях. Солнце молодые рачки впервые увидели, когда их всех вместе выпустили на берегу, — они устреми-

лись к морю в том же направлении, что и их родители.

Поиск пауками-волками и песчаными блохами места, откуда они отправляются за «провизией», напоминает ориентацию пингвинов. Эти медлительные, ходящие вперевалочку птицы — излюбленный объект наблюдения орнитологов. Изучать пингвинов действительно очень удобно: их не нужно кольцевать, прикреплять к ним миниатюрные радиопередатчики, преследовать на самолете. Пингвин передвигается по суше крайне медленно, и маршрут его легко проследить по отпечаткам лап на поверхности снега.

Если пингвина, обитающего на берегах Антарктиды, завести в глубь материка и там выпустить, он всегда начинает двигаться на север. Правда, он редко берет курс на свою колонию, но непременно следует в сторону побережья: близость к воде имеет в жизни пингвинов первостепенное значение, так как питаются они только рыбой, которую ловят в море. Добравшись до берега, где ему обеспечен прожиточный минимум — ежедневная порция рыбы, пингвин уже с помощью другого механизма принимается искать колонию, из которой был насильственно увезен в глубь материка. Направление на север пингины определяют, ориентируясь по



Солнцу, а поскольку оно перемещается по антарктическому небосклону, пингвины с помощью внутренних часов вносят поправку на видимое движение Солнца. Если небо полностью затянуто облаками, пингвин семенит то в одну, то в другую сторону, не в состоянии правильно выбрать направление.

Существование у этих птиц внутренних часов получило экспериментальное подтверждение, когда пингвинов с советской научно-исследовательской обсерватории Мирный перевезли за 3500 километров на острова Крозе. По земным масштабам расстояние это относительно невелико, но границы часовых поясов к полюсу сближаются, поэтому местное время на островах Крозе отличается от местного времени на станции Мирный на 6 часов. Разность, о которой мы говорим, относится не к заходам и не к восходам, а к моменту времени, когда Солнце занимает на небосводе заранее заданное положение (например, когда оно видно точно на севере), поскольку за Полярным кругом (как Северным, так и Южным) Солнце летом не опускается за горизонт, а описывает круги по небосводу против часовой стрелки. Переселение пингвинов из Антарктиды на острова Крозе оказало такое же действие, как описанные выше переселения пе-

счаной блохи: выпущенные на новом месте, пингвины начинали двигаться не на север, а на запад, поскольку их биологические часы все еще показывали старое время. Но стоило экспериментаторам продержать пингвинов три недели под открытым небом, а затем выпустить на волю, и те безошибочно выбрали направление на север. Следовательно, описывая по небосводу круги, Солнце, даже если оно не заходит за горизонт, по-прежнему сдвигает биологические часы, устанавливая их по новому местному времени.

Совершенно ясно, что все перечисленные нами механизмы позволяют организмам лучше приспособиться к окружающей среде. Хорошим примером экономности природы может служить то, что у тех или иных видов животных сформировались лишь такие типы сложной и точной ориентации, какие необходимы для выживания.

### **Сезонные миграции птиц**

С приближением зимы часть птиц, обитающих в зонах умеренного и холодного климата, улетают на юг. Возвращаются они только весной, когда устанавливается теплая погода. Сигналом, по которому птицы пускаются в путь, служит изменение относительной продолжительности дня и ночи, о



чем мы уже рассказывали в предыдущей главе. Но выбор направления полета происходит в первую очередь по *ориентирам, видимым на небе*, хотя не исключено, что определенную роль играет и ощущаемое птицами магнитное поле Земли.

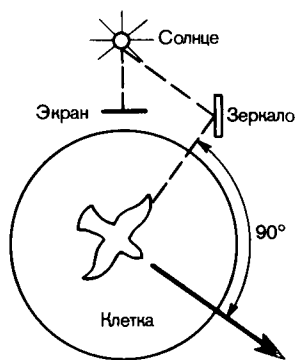
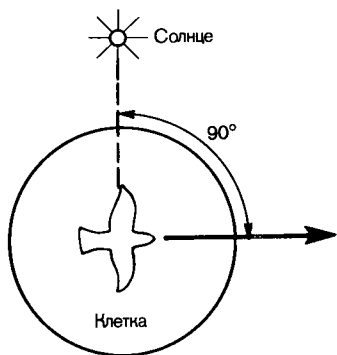
Мелкие птицы, как правило, летят по ночам, а днем ищут корм. Более крупные птицы предпочитают совершать перелеты днем. Поэтому при выборе направления к месту зимовки им приходится пользоваться разными ориентирами. И в том и в другом случае точность ориентации поразительна: как показали наблюдения, 75% окольцованных малиновок свили гнезда не далее чем в 7 километрах от прошлогодних гнезд.

Наблюдать, как ориентируются перелетные птицы, трудно, поскольку (в отличие от пингвинов) они весьма быстро скрываются из виду, и наблюдатели успевают заметить только, в каком направлении они летят. Густав Крамер решил эту проблему, поставив опыт, который ныне по праву считается классическим. Отловленных перелетных птиц Крамер посадил в клетку, стоящую под открытым небом, и с наступлением прохладных осенних дней установил за ними постоянное наблюдение. Как только наступила пора перелетов, птицы обнаружили

«перелетное беспокойство»: они безостановочно перепархивали в клетке с места на место, но при этом сохраняли определенное направление. В ненастную погоду такого предпочтительного направления не было, но стоило показаться Солнцу, как птицы (а это были дневные мигранты) возобновляли попытки лететь в направлении своих обычных миграций. Крамеру удалось убедительно доказать роль Солнца и биологических часов в ориентации птиц. Если Солнце закрыть от птиц непрозрачным экраном и с помощью зеркала направить на них солнечные лучи с другой стороны, то менялось и направление полета. При легко осуществимом в лабораторных условиях с помощью искусственного цикла свет-темнота сдвиге фазы внутренних часов птиц на 6 часов они устремлялись на восходе Солнца в направлении, составлявшем с истинным курсом угол в  $90^\circ$ .

Возникает вопрос, какие биологические часы использует организм для своей ориентации и те ли это часы, которые регулируют протекание других процессов его жизнедеятельности?

Скворцов обучили тому, что корм всегда находится к северу от клетки. У птиц, содержащихся при постоянных условиях, устанавливался ритм активности с периодом



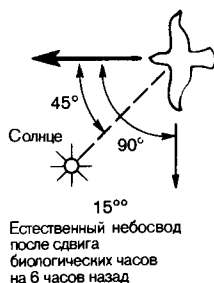
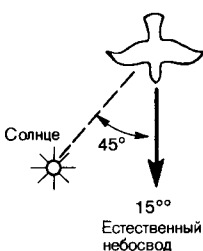
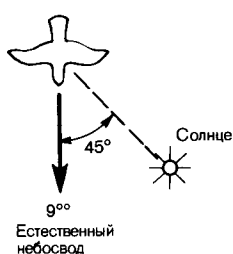
Роль Солнца в ориентации перелетных птиц. Если птиц освещать отраженными от зеркала солнечными лучами, падающими под другим углом, направление полета птиц также менялось.

23,5 часа. Через 10–12 дней скворцов выпускали на волю. Выбранное ими направление полета показало, что выработавшийся у скворцов сдвиг фазы на 5–6 часов распространился и на способность ориентироваться в пространстве: вместо того чтобы лететь на север, они отправились на по-

иски корма на запад. Следовательно, оба циклических процесса регулируются одними и теми же часами.

Другой вопрос: является ли способность ориентироваться по Солнцу результатом обучения или она передается по наследству?

Едва вылупившихся птен-



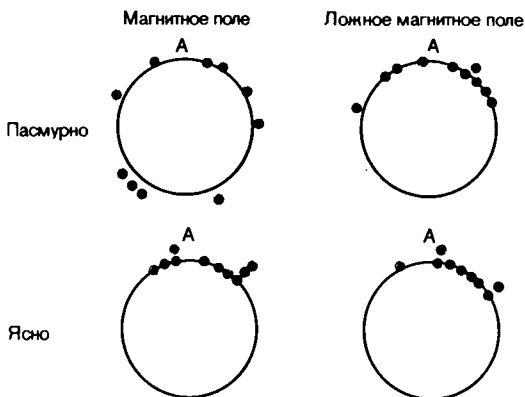
Поправка на видимое движение Солнца, вносимая перелетными птицами с помощью биологических часов. Направление полета остается постоянным. Если с помощью искусственного цикла свет – темнота перевести внутренние часы на 6 часов назад, то в 15 часов по местному времени они будут показывать только 9 часов утра, и в направлении полета птицы появится соответствующая ошибка.

цов аиста и чирка окольцевали, продержали в неволе до тех пор, пока птицы старшего поколения не улетели, и только тогда выпустили. Следующей весной окольцованных птиц обнаружили в родных местах вместе с собратьями по виду, улетевшими осенью без всякой задержки. Следовательно, способность находить дорогу основана на наследственных механизмах. С иной ситуацией мы сталкиваемся у птиц, совершающих перелеты ночью. Судя по всему, они ориентируются главным образом по звездам. Видимое движение звезд происходит по своему, звездному времени: звездные сутки составляют 23 часа 56 минут. Следовательно, при движении по таким часам необходимо вносить поправку, которая всего на 4 минуты отличается от периода 24-часового цикла, регулирующего любые другие суточные ритмы. Именно поэтому птицы обращают внимание только на Полярную звезду и еще на несколько звезд, расположенных поблизости от нее. В течение ночи Полярная звезда описывает вокруг северного Полюса мира небольшую окружность и поэтому с достаточной точностью указывает направление на север. Полюс мира — это та точка небосвода, на которую указывает земная ось. По самому своему смыслу она неподвижна.

## Навигация почтовых голубей

Во всех описанных выше способах ориентации основная проблема состояла в определении одного какого-нибудь направления, и для решения этой проблемы использовались биологические часы и небесные светила. Другая проблема возникает в том случае, когда сначала требуется определить, где находится отправной пункт, и лишь после того, как его местоположение установлено, выбрать оптимальное направление полета. Такого рода деятельность называется *навигацией*. Весьма искусными навигаторами по праву слывут специально выведенные породы почтовых голубей. Почтовый голубь, даже если его увезти за 1000 километров, в большинстве случаев летит к привычной голубятне по кратчайшему маршруту. Способностью возвращаться к гнездовьям из незнакомых дальних мест обладают многие птицы.

Механизм навигации пока не выяснен. Некоторые исследователи считают, что птицы наделены способностью определять высоту Солнца над горизонтом в полдень по тому, где оно находится в момент наблюдения, который в свою очередь определяется по внутренним часам. Взяв высоту Солнца, навигатор действи-



Роль магнитного поля Земли в ориентации почтовых голубей. Птицы, на головах которых был прикреплен крохотный электромагнит, в пасмурную погоду летали в самых разных направлениях, в то время как голуби, на головах которых были закреплены равные по весу магнитам латунные палочки, ориентировались хорошо. В ясную погоду обе группы голубей летели в направлениях, разброс которых варьировал в пределах дуг, обозначенных буквой А.

тельно может определить, где он находится, но неясно, каким образом почтовый голубь успевает установить свое «место» за считанные секунды, и уже совсем трудно понять, каким образом почтовый голубь находит дорогу домой в пасмурную погоду. Исследователи давно утверждали, что какую-то роль в голубиной навигации может играть магнитное поле Земли, и в отдельных

опытах, укрепляя на головах почтовых голубей крохотные электромагниты, им удавалось нарушить ориентацию голубей.

Весьма вероятно, что по ходу навигации птицы используют разнообразную информацию и именно это разнообразие позволяет пернатым навигаторам достигать высокой точности.

# Ритмы человека

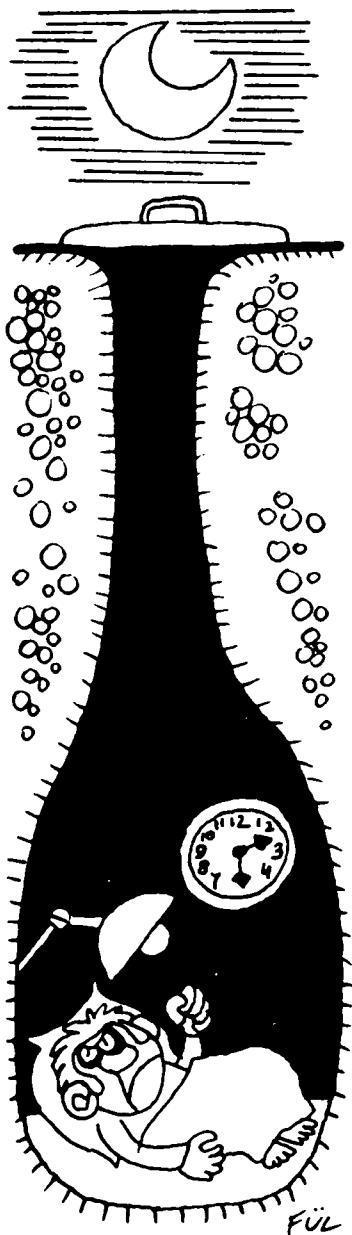
## Условия наблюдения суточных ритмов

Почти с каждым процессом, протекающим в человеческом организме, связан тот или иной 24-часовой цикл. Очень трудно, почти невозможно решить, какой из этих циклов связан с биологическими часами непосредственно, а какой — через какой-либо иной периодический процесс. Поэтому в дальнейшем нас будет интересовать исключительно описание ритмов — вне их связи с биологическими часами.

Часть наших наблюдений проводилась над людьми в обычной для них обстановке, часть — над добровольцами, находившимися в условиях постоянного освещения и температуры. Последние наблюдения позволили многое выяснить в функционировании внутренних механизмов. Первые исследования такого рода были проведены в годы второй мировой войны в бомбоубежищах. Впоследствии, когда полученные результаты привле-

кли внимание специалистов, для получения более подробных данных были построены особые подземные помещения типа бункера. Кроме удобной комнаты в них имелись душевая и кухня. Служебные обязанности добровольного обитателя такой лаборатории были не слишком обременительными: есть три раза в день, в обычной для него последовательности, не отдыхать после обеда, а проводить несколько психологических испытаний. Связь с внешним миром поддерживалась через тамбур. Там же находился холодильник с запасом провизии, который пополнялся без строго определенного графика. Кандидаты в «подопытные кролики» набирались из числа студентов, готовившихся к сдаче экзаменов.

Другие данные были получены из наблюдений, проводившихся в пещерах. Люди в одиночку или небольшими группами с исследовательскими целями или из любви к сенсационным рекордам забира-



лись в особо глубокие подземные пещеры и оставались там на протяжении 2–6 месяцев.

И наконец третий вариант создания постоянных условий предоставляют ученым полярные лаборатории, где 6 месяцев Солнце не заходит за горизонт и где температура колеблется в весьма узких пределах. Наблюдения за состоянием метеорологов на полярных станциях позволили получить очень много интереснейших данных.

### **Наблюдения за циклом сон–бодрствование**

*Чередование сна и бодрствования* – процесс жизнедеятельности человека с наиболее выраженным 24-часовым ритмом.

Весьма интенсивные исследования ритма сон–бодрствование начались с середины пятидесятых годов. Однако большинство наблюдений проводится не для установления механизмов регуляции этого суточного ритма и стоящих за ним внутренних часов. Нейрофизиологические исследования направлены прежде всего на выявление тех структур мозга, которые могли быть центром сна (его удаление и раздражение приводит к однозначно выраженным результатам), и проводятся для того, чтобы попытаться понять биологическое назначе-

ние, биологический смысл сна. Пока не удалось получить окончательного решения ни одной из проблем.

В экспериментах, проводимых при постоянных условиях, чередование сна и бодрствования, как правило, обладало весьма стабильным периодом, который почти без исключений оказывался длиннее 24 часов. В шести наиболее важных наблюдениях, выполненных в пещерах, средний период составлял 24 часа 42 минуты.

Наручные часы одного из добровольцев-одиночек продолжали идти 105 суток, на протяжении которых он находился в пещере под землей. Перед спуском он решил, что будет спать, как обычно, и ложиться всегда в одно и то же время. Однако вечерами ему долго не удавалось заснуть, и по утрам он вставал позже обычного. По прошествии трех недель испытуемый решил лечь спать, лишь когда почувствует, что его клонит ко сну. У него развился устойчивый циркадный ритм с периодом 24,7 часа, сохранившийся до конца эксперимента. Таким образом, наручных часов и принятого решения оказалось недостаточно, чтобы возместить недостаток синхронизирующих факторов, которые действуют в нормальных условиях.

Аналогичным образом и у

испытуемых в специально оборудованном подземном жилище наблюдался циркадный цикл с периодом больше 24 часов. Средняя продолжительность периода, по наблюдениям над 100 добровольцами, составила 25,1 часа. Различия в полученных результатах были незначительными и зависели от того, могли ли обитатели бункера по своему усмотрению включать и выключать электрический свет или находились в условиях постоянного освещения (или постоянной темноты).

Новые данные были получены в связи с *социальными синхронизирующими факторами*. Четырех человек поселили в одном подземном помещении при постоянном освещении. На протяжении 13 суток их циклы совпадали по фазе, хотя один из испытуемых вставал рано. Но с третьей недели трое остальных испытуемых начали подремывать днем (что не запрещалось условиями проведения опыта), и начиная с 17-х суток их ритм разошелся с ритмом рано встававшего товарища. Еще через несколько суток у каждого испытуемого начал сокращаться период ритма. Исследователь, пришедший объявить об окончании эксперимента, застал всех за праздничным столом, но один из великолепной четверки завтракал, другой обедал, а третий с

четвертым ужинали. Все это свидетельствует о том, что социальных связей между членами группы оказалось недостаточно для обеспечения синхронизации их ритмов.

Разумеется, в обычных условиях человек находится под действием гораздо более многообразных социальных связей. Точное начало рабочего дня, время обеденного перерыва, часы работы предприятий и учреждений, зрелищных заведений, программы телевизионных передач, общественная деятельность — все это синхронизирующие циклы с 24-часовым ритмом.

Особый интерес представляют те наблюдения, которые проводились над людьми, живущими в обычных условиях, с целью установить зависимость между привычным режимом сна и индивидуальными особенностями человека. Людей, над которыми проводились наблюдения, исследователи разделили на малоспящих и многоспящих. В первую группу были включены те, кто спит в среднем менее 6 часов, а во вторую — те, кто спит не менее 9 часов. Малоспящие оказались людьми активными, энергичными, не склонными обременять себя размышлениями над различными жизненными проблемами, с немалой амбицией. В отличие от них «соны» были

людьми робкими, нерешительными, самоуглубленными, вечно погруженными в обдумывание каких-то проблем. Правда, другие наблюдения не подтвердили существование зависимости между индивидуальными особенностями человека и его привычным режимом сна. Тем не менее необходимо отметить, что большинство людей не принадлежит к какому-то одному четко выраженному типу и продолжительность их сна зависит от многих социальных факторов. Немало найдется таких людей, которые в начале недели недосыпают, а в конце недели отсыпаются, наверстывая упущенное.

### **Температура тела и работоспособность**

Еще в середине прошлого века стало известно, что температура человеческого тела не постоянно равна  $36,6^{\circ}\text{C}$ , а подвержена *суточным колебаниям*: на рассвете она понижается, к полудню постепенно повышается, вечером достигает максимума, а затем снова понижается, особенно быстро после того, как человек заснет. Амплитуда колебаний температуры составляет  $0,7 - 0,8$  градуса. Поскольку температура тела зависит от баланса между теплом, вырабатываемым и отдаваемым телом, сначала думали, что колебания темпе-

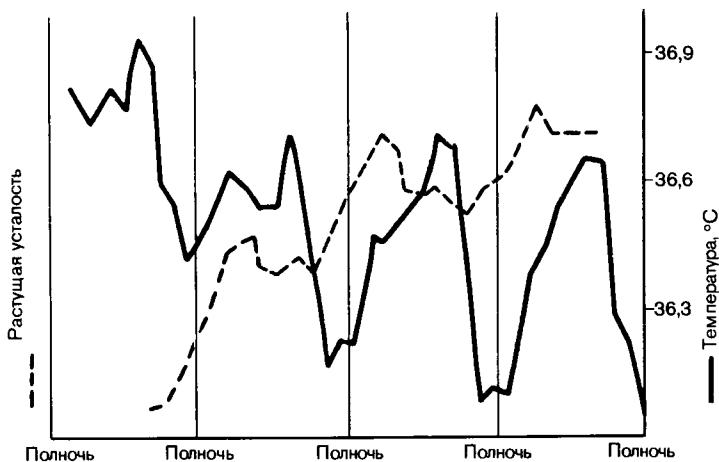


ратуры просто повторяют ритм мышечных движений, пищеварения и других функций организма. Среди наблюдавшихся были и больные, находившиеся на постельном режиме, которых кормили строго по расписанию, и те, кто лечился голодом от ожирения. Повышение температуры не нарушало цикличности. Было неопровержимо установлено, что во второй половине дня к вечеру температура выше, чем в утренние часы.

Циклические изменения температуры тела были отмечены и в некоторых наблюдениях, проводившихся в подземных помещениях. Испытуемым добровольцам вводили в прямую кишку термодатчик и на протяжении нескольких недель регистрировали изменения

температуры. Через пять-шесть дней после начала наблюдений испытуемых разделили на две группы и одну из них поместили в условия постоянной темноты. В обеих группах в изменениях температуры тела испытуемых был обнаружен циркадный ритм с периодом около 25 часов.

Весьма интересно, что при более длительных наблюдениях ритмы сон-бодрствования и колебаний температуры тела часто происходили с различными периодами и сдвиг фаз между ними возрастал с каждым днем. Само по себе это еще не означает, что ритмы чередования сна и бодрствования и колебаний температуры тела регулируются двумя независимыми часами (что наиболее вероят-



Колебания температуры тела (сплошная линия) и субъективного ощущения усталости (прерывистая линия) у людей, не спавших трое суток.

но), но, учитывая многосторонние физиологические взаимосвязи, все это достаточно удивительно.

Гораздо более сильная зависимость существует между температурой тела, с одной стороны, и работоспособностью или ощущением усталости — с другой. В одном из опытов роте солдат, бодрствовавших трое суток по определенному графику, измеряли температуру и спрашивали, ощущают они усталость или нет. Если не считать того, что при бессоннице ощущение усталости обычно нарастает, а температура тела постепенно падает, и в колебаниях температуры, и в вариациях субъективного ощущения усталости обнаружился хорошо знакомый 24-часовой ритм: циклы оказались зеркально-симметричными, то есть бодрее всех ощущал себя тот, у кого была самая высокая температура, и наоборот, человек ощущал себя полностью выдохшимся, когда сильнее всего «остывал». Это явление испытал на себе каждый, кому по каким-либо причинам (ночное дежурство, подготовка к экзамену и т. д.) приходилось не спать по ночам. Кризис, то есть наиболее сильное желание принять горизонтальное положение, наступает между 1 и 3 часами ночи, что совпадает с минимумом температуры те-

ла. Разумеется, это не означает, что между субъективным ощущением усталости и колебаниями температуры тела имеется существенная зависимость, но делает более вероятным параллелизм между суточными колебаниями работоспособности самого различного типа и ритмом изменения температуры тела. Чаще всего ссылаются на классическое наблюдение — анализ ошибок при считывании показаний счетчика на газовом заводе. Распределив ошибки за 20 лет по времени суток, когда снимались показания счетчика, ученые обнаружили, что количество ошибок особенно велико на рассвете, а второй, несколько меньший максимум ошибок приходится примерно на 2 часа пополудни. На кривой зависимости температуры тела от времени меньшему максимуму соответствует «провал», а главный максимум ошибок при считывании показаний счетчика совпадает с главным минимумом температурной кривой.

Наши наблюдения помогли установить, как изменяются в зависимости от времени суток температура тела и работоспособность тех, кто рано ложится спать и рано встает, и тех, кто поздно ложится спать и поздно встает. Разбудить утром «ночных сов» удастся лишь с большим трудом. Изменения температуры у «сов»

отстают на 1–2 часа по сравнению с «жаворонками». В тестах на проверку внимательности, например при вычеркивании из текста той или иной буквы, «совы» по утрам показывают худшие результаты, чем бодро встающие с постели и быстрее согревающиеся «жаворонки». Позже «совы» постепенно переходят в бодрствующее состояние, их работоспособность достигает максимума к 10 часам вечера. К этому времени температура тела у тех, кто встает рано, уже понижается, и они охотно укладываются спать.

### **Ритм сердца как градусник**

В функционировании системы кровообращения решающая роль принадлежит регуляции *сердечного ритма*. По ночам, когда температура тела понижается, сердце гонит кровь медленнее, чем днем. При повышении температуры на 0,5 градуса частота сердцебиения увеличивается примерно на 10–15%. Врачи часто определяют температуру больного, подсчитывая его пульс, хотя в норме у частоты сердцебиения существует довольно большой разброс.

Биение пульса вызвано внутренней причиной и связано с деятельностью клеток сердца. За несколько лет до того, как пересадка сердца привлекла к

себе всеобщее внимание, был проведен следующий эксперимент. Сердце животного-реципиента иссекли не полностью, оставив ту его часть, которая содержит водитель ритма – *синусный узел*. К оставленному фрагменту пришили целое сердце животного-донора. Разумеется, сокращениями нового сердца управлял не оставшийся от старого, а свой собственный центр. На ЭКГ реципиента, снятой через 32 суток после операции, отчетливо было видно, как функционируют оба синусных узла. Они периодически замедляли или ускоряли свою активность с 23,4-часовым циркадным периодом, но не совпадали по фазе на 2 часа 15 минут. Поскольку новое сердце не было включено в нервную систему реципиента, ритм сердечных сокращений животного мог регулироваться либо гормональным путем, либо часами, «вмонтированными» в клетки сердца. Против первого предположения свидетельствует существующий между двумя ритмами сдвиг фазы, второе, наоборот, подкрепляется наблюдениями над сердцем хомяка. Удаленное из организма и помещенное в питательный раствор, сердце животного сохраняло суточный ритм, и даже в сокращениях изолированных клеток сердечной мышцы по-прежнему наблюдалась цикличность.

## Ритм деятельности почек

Почки в различное время суток функционируют с различной интенсивностью. Ночью почки выводят мочу медленнее, что позволяет спящему не вставать каждые 3-4 часа. На ритм почечной деятельности обратили внимание еще в прошлом веке, но объясняли его чисто внешними причинами — ссылаясь на то, что во сне человек не ест и не пьет. Однако, как показали более поздние исследования, у голодающих, у больных, получающих одну и ту же пищу через строго определенные промежутки времени, у людей, находящихся в обычных условиях и в условиях постоянного освещения, выведение мочи подчиняется суточному ритму. Эта цикличность проявляется не только в количестве выводимой мочи, но и в колебаниях ее ионного состава.

Исследования, проведенные в подземных бункерах, показали, что при постоянных условиях эти ритмы взаимосвязаны. Например, у одного пациента при 32,5-часовых циклах сон — бодрствование и выведения кальция ритм изменения температуры, выведения мочи и ионов калия имел 24,7-часовой период. В течение 3-4 суток все ритмы совпадали по фазе, и в это время наблюдать их было особенно легко.

С цикличностью функцио-

нирования гормональной системы связано распределение частоты рождений по времени суток. Изучение записей в журналах родильных домов дает очень большой материал. Пик 200 тысяч разрывов околоплодного пузыря и предродовых схваток (а также сопровождающих их процессов) приходился на ночь. Максимум из 2 миллионов родов приходился на промежуток времени между часом ночи и семью часами утра. Было бы неправильно упрекать родившихся на рассвете детей в безтактности по отношению к их мамам, чей ночной отдых был нарушен, ибо время рождения определяется гормональной деятельностью материнского организма.

## Чувствительность к внешним воздействиям

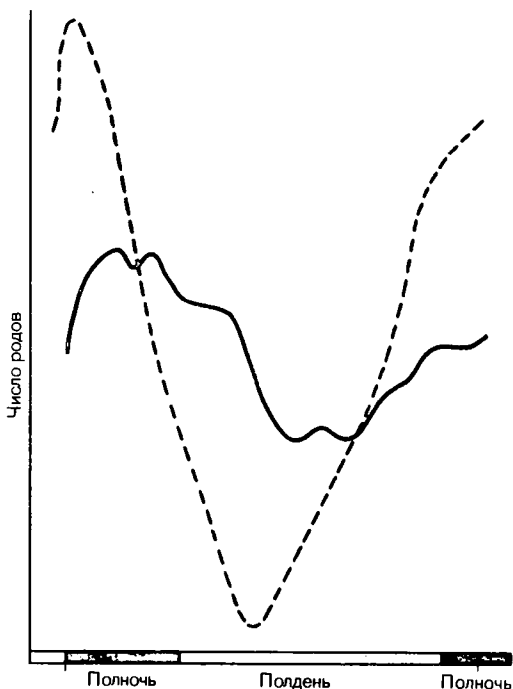
На протяжении суток наш организм может испытывать на себе какие-либо внешние воздействия, причиняющие тот или иной ущерб. Разумеется, наблюдения такого рода над людьми проводятся лишь в исключительных случаях. Однако имеющиеся данные позволяют утверждать, что чувствительность нашего организма подвержена циклическим изменениям, и поэтому особое внимание необходимо обратить на действие различных токсичных веществ, к числу ко-

торых нередко относятся и прописываемые врачами в лечебных целях.

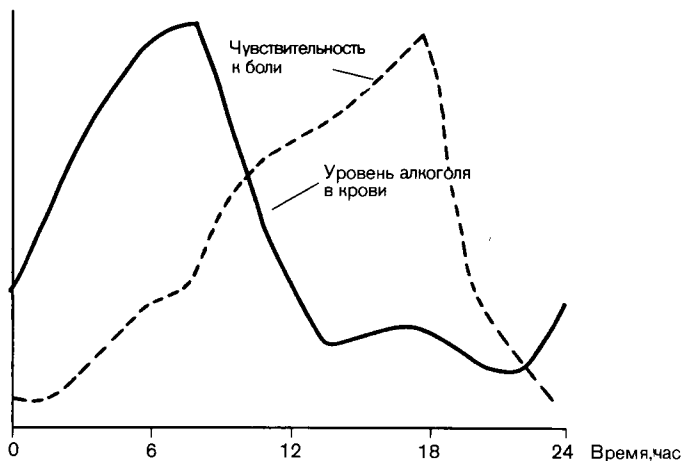
**Алкоголь.** Из токсичных химических веществ хорошо известны суточные колебания в воздействии алкоголя на организм человека.

После всасывания алкоголь кровотоком разносится по всему телу и нередко приводит к слабому отравлению первой сигнальной системы. (Собственно говоря, ради вызы-

ваемых этим отравлением ощущений люди и употребляют спиртные напитки.) Обезвреживают алкоголь в организме, превращая его в нетоксичные химические соединения, специальные вещества – *ферменты*. Скорость всасывания алкоголя в кровь и быстрота его разложения – характеристики сугубо индивидуальные и могут варьировать в широких пределах, но они в значительной степени зависят от условий приема алкоголя,



Суточный ритм родов (данные по 200 тысячам вскрытий околоплодного пузыря и первым схваткам – прерывистая линия – и 2 миллионам родов – сплошная линия).



Кривая изменения уровня алкоголя в крови при ежечасном приеме одной и той же порции виски и кривая суточного ритма чувствительности к боли, построенная по субъективному ощущению.

например от наполненности желудка, от содержания углекислоты в спиртном напитке и т. д. Кроме того, как показывает один эксперимент, поставленный американскими учеными, активность обезвреживающих алкоголь ферментов также подвержена изменениям в течение суток.

С энтузиазмом откликнувшиеся на призыв добровольцы принимали одно и то же количество виски с интервалом в час. Оберегая сон своих добровольных помощников, экспериментаторы разделили полуденную порцию между дозами, предназначенными к приему в 1 и в 2 часа ночи, а предраусветную (3-часовую) — между дозами, предназначенными к приему в 4 и в 5 ча-

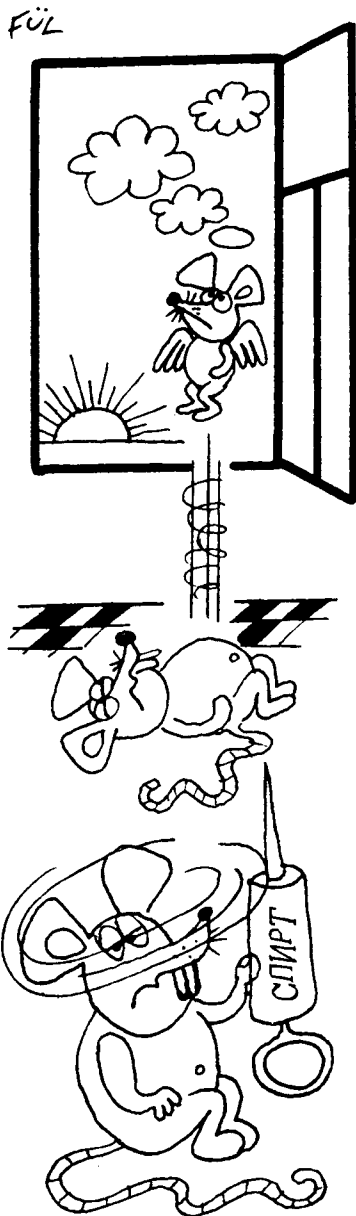
сов утра. Перед каждым приемом виски у подопытных брали на анализ кровь и определяли уровень алкоголя в ней. Разумеется, доза была выбрана такой, чтобы она ни у кого не вызывала сильной интоксикации.

Концентрация алкоголя в крови утром возрастала в 7 раз по сравнению с ночной, но к полудню понижалась. Во второй половине дня и вечером уровень алкоголя в крови оставался примерно на одном и том же низком уровне. Таким образом, влияние спиртного, выпитого на рассвете и утром, оказалось гораздо более сильным, а вечером алкоголь расщеплялся и переходил в безвредные соединения на 25% быстрее.

«Пьяные грызуны». При изучении действия токсичных веществ на живые организмы объектами исследования чаще всего были мыши и крысы. Как и во всех экспериментах на животных, самая большая трудность состоит в перенесении полученных результатов на человеческий организм. Грызуны ведут ночной образ жизни, поэтому их суточный цикл сдвинут по фазе на 12 часов по отношению к суточному циклу человека. Следовательно, если мы хотим применить в лечебной практике результаты, полученные в экспериментах на мышках и крысах, то кривые чувствительности также надлежит сдвинуть на 12 часов<sup>1</sup>.

Общее правило заключается в том, что самые различные токсичные вещества оказываются наиболее эффективными, если их прием приходится на *активный период* цикла организма. В одном из первых экспериментов изучалось действие алкоголя на мышей. В отличие от описанной выше американской методики исследователи, ставя опыты на грызунах, отнюдь не стремились уберечь животных от алкогольной интоксикации. Наобо-

<sup>1</sup> Этот пример не совсем удачен, так как биологические ритмы человека во многом отличаются от биологических ритмов грызунов.



рот, о действии алкоголя на мышей и крыс судили именно по числу смертельных исходов. Второе отличие состояло в том, что мыши не пили виски из рюмок, а получали 25%-ный алкоголь в виде инъекций в брюшную полость. Различным группам мышей инъекция производилась со сдвигом на 4 часа. Наибольшая смертность наблюдалась с 16 до 20 часов, то есть примерно в то время, когда свет сменяется темнотой (в 18 часов). У человека с его дневной активностью это соответствовало бы рассвету или раннему утру, когда скорость расщепления алкоголя наименьшая.

Аналогично выглядят и кривые временных зависимостей чувствительности организма по отношению к другим токсичным веществам. Так колеблется восприимчивость организма к инфекционным заболеваниям, например к вызываемому пневмококками воспалению легких и — в различной мере — к вредному действию никотина.

С практической точки зрения суточный ритм может оказаться чрезвычайно важным для эффективного применения не только токсичных, но и снотворных и обезболивающих веществ. Например, у мышей и крыс снотворное фенobarбитал в темное время суток, то есть в период их двигательной активности, вызывает гораздо

более продолжительный сон, чем утром. Применительно к человеку это означает, что фенobarбитал эффективнее всего действует, если его принимать в начале дня.

**Когда лучше всего идти к зубному врачу?** Суточный ритм чувствительности человеческого организма был обнаружен не только в опыте по изучению действия алкоголя в различное время суток, но и совсем в другом эксперименте, менее приятном для добровольцев, чем ежедневный прием определенной дозы виски, хотя и имеющем не менее серьезное значение для медицины.

Многие люди страдают от различного рода аллергий, в просторечии именуемых в зависимости от симптомов сенной лихорадкой или крапивницей. Сравнительно легко отделяются лишь те аллергики, которые обладают повышенной чувствительностью к цветочной пыльце: как известно, пыльца появляется в строго определенное время года. Но есть среди аллергиков реагирующие на различную «домашнюю» пыль. У шести таких аллергиков суточный ритм синхронизировали через неделю, после чего со сдвигом в 4 часа им вводили подкожно вытяжку из пыли. Через 15–20 минут после инъекции появлялась краснота, и по величине отека экспериментаторы суди-



ли об интенсивности аллергической реакции. Самая сильная реакция наблюдалась в 10 часов вечера, самая слабая — в 11 часов утра. Наблюдение повторили, но на этот раз аллергикам в 7 часов утра и в 7 часов вечера давали противоаллергические средства. Медикаментозное вмешательство сильно ослабило симптомы. Аллергическая реакция на вечернюю инъекцию продолжалась 6–8 часов, на утреннюю — 15–17 часов. С суточным ритмом колеблется не только интенсивность протекания болезни, но и *эффективность действия медикаментозных препаратов*. Лечебный эффект значительно повышается, если схему приема лекарств согласовать с циклом чувствительности.

Белокровие, или лейкемия, — одна из разновидностей опухолевого заболевания кровяной ткани, часто приводящая к смертельному исходу. При лейкозном патологически возрастает число лейкоцитов, или белых кровяных клеток. Поскольку речь идет о клетках, разносимых током лимфы по всему организму, ясно, что образуется очень много очагов опухолевых поражений и хирургическое вмешательство практически невозможно. В этих случаях больного подвергают облучению или дают ему цитостатические средства — лекарственные препараты, бло-

кирующие деление клеток и таким образом тормозящие безудержный рост числа лейкоцитов.

И при облучении, и при применении цитостатиков необходимы дозы, близкие к допустимым уровням, при которых еще не нарушаются процессы жизнедеятельности, но уже не происходит деления целых клеток. Вред, причиняемый организму облучением или цитостатиками, можно уменьшить или даже исключить совсем, если суточную дозу разделить на несколько более мелких доз, распределив их в соответствии с суточным ритмом чувствительности.

Одна группа мышей получила дозу облучения в 200 рентген в 21 час, другая — в 9 часов. Мыши, облученные вечером, погибли, а мыши, получившие такую же дозу радиации утром, прожили еще 10 суток. Одна из групп мышей, зараженных в экспериментальных целях лейкемией, получала дозы облучения по обычной схеме, другая — по схеме, согласованной с суточным ритмом. Мыши из первой группы вскоре погибли, а мыши из второй группы остались живы.

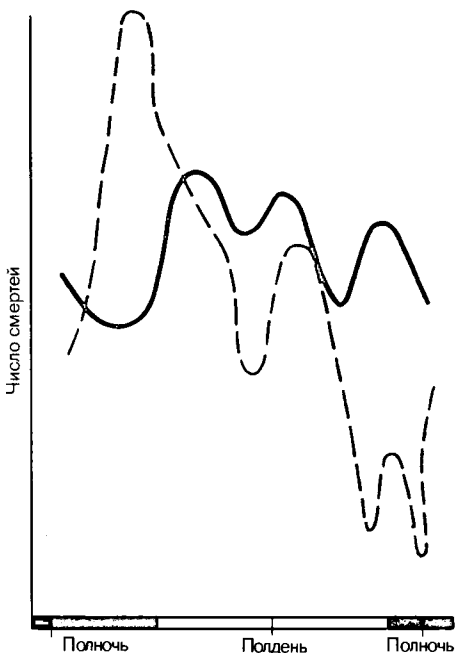
С аналогичной ситуацией мы сталкиваемся и в случае второго способа лечения опухолевых заболеваний — путем торможения клеточного деления. Если в кровь мыши ввести

небольшое количество опухолеродных клеток, то через сутки ее еще можно вылечить, давая каждые три часа цитостатики, блокирующие деление клеток. Но если к лечению приступить позже, число опухолеродных клеток достигает такого уровня, когда уже необходимо ввести столько цитостатиков, что мышшь гибнет не от лейкемии, а от отравления лекарствами. Тем более, что мышши на протяжении суток неодинаково реагируют на вещества, блокирующие деление клеток. При одной и той же дозе цитостатиков мышшь погибает гораздо больше, если лекарство вводится ночью, в активный для грызунов период.

Учитывая это, суточную дозу цитостатика разделили так, что ночью мышши получали минимальное количество вещества. Наблюдения велись на протяжении 4 суток. К концу этого времени в контрольной группе, где мышши получали суточную дозу цитостатика, разделенную на равные доли, погибло почти вдвое больше мышшь, чем в основной группе, где на ночь приходилась минимальная доля суточной дозы. Поэтому при лечении людей для достижения большего терапевтического эффекта цитостатические препараты следовало бы давать по схеме, приспособленной к суточным колебаниям чувствительности человеческого организма.

Суточному ритму подчиняются не только изменения способности организма сопротивляться действию химических веществ, но и изменения чувствительности нервной системы. Добровольцам каждый час на кожу или на зубы подавали однократный болевой раздражитель. Остроту болевых ощущений оценивали в баллах по специальной шкале. Оказалось, что и кожные, и зубные болевые раздражители вызывают больше неприятных ощущений с полуночи до 6 часов пополудни, а с 18 до 24 часов беспокоят меньше. Следовательно, лечить зубы лучше всего в вечерние часы, когда пытка зубной болью воспринимается нами менее остро.

Вероятность смертельного исхода болезни также варьирует в зависимости от времени суток. По данным, собранным из 430 тысяч историй болезни, следует, что бо́льшая часть людей умирает около 6 часов утра. Второй, меньший пик наблюдается в 16 часов. Если изучить кривую ритма работоспособности людей, то выясняется, что самый глубокий минимум работоспособности приходится на рассвет; еще один минимум, хотя и не такой глубокий, наблюдается после полудня. По-видимому, по каким-то еще не известным причинам эффективность деятельности всего организма падает в эти моменты до минимума, и



Вероятность смертельного исхода в различное время суток по данным о 430 тысячах смертельных исходов (прерывистая линия) и о 12 тысячах мертворожденных (сплошная линия).

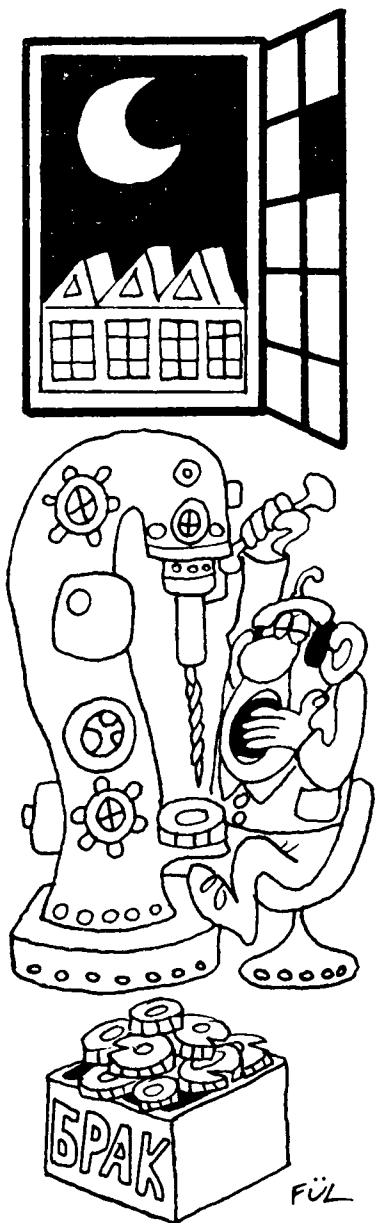
тогда способности организма сопротивляться тяжелой болезни оказывается недостаточно для сохранения жизни.

### **Десинхронизация суточных ритмов**

В обычных условиях в ритмах различных жизненных процессов у человека могут наблюдаться определенные сдвиги фаз. В случае циклов, непосредственно связанных с биологическими часами, сдвиг фаз регулируется синхронизирую-

щими факторами, важнейшими из которых для человека являются социальные связи, а из прочих факторов внешней среды первейшую роль играет чередование света и темноты. Синхронизация остальных суточных ритмов осуществляется при посредничестве этих главных факторов.

Согласованность ритмов сравнительно легко нарушается при изменении воздействий, определяющих «тайминг» организма. В наблюдениях, проводившихся при постоянных



условиях (в пещерах, подземных лабораториях и т. д.), часто отмечались процессы, протекавшие с различными циркадными периодами. Ритмы сна, изменений температуры тела, интенсивности выведения мочи десинхронизировались неоднократно, но эти процессы не всегда шли в фазе.

Установлено, что рассогласование циклов, как правило, сопровождается неприятными ощущениями, ухудшением самочувствия, а последующее согласование приводит к улучшению общего состояния. Когда речь заходит о процессах, связанных с десинхронизацией, нередко говорят о *стрессовом состоянии*, при котором в организме происходят изменения, вызываемые действием так называемых *стрессоров*, или *факторов напряжения*.

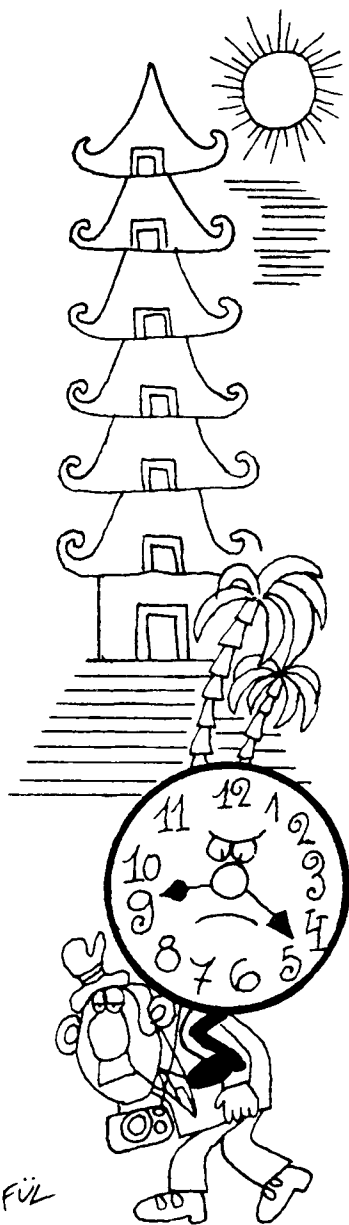
**Когда лучше работать — днем или ночью?** В повседневной жизни стрессовые состояния возникают довольно часто, и чтобы наблюдать их, не нужно спускаться в подземные пещеры или забираться в специально оборудованные бункеры. Причиной, вызывающей десинхронизацию ритмов, может быть и необычно поздний отход ко сну, и необычно ранний подъем. Существуют люди, которые поздно ложатся спать и поздно просыпаются. Иным, чтобы подняться рано утром к началу рабочего дня,

приходится делать усилие над собой. Как правило, они не могут проснуться сами, их приходится будить. И первая половина рабочего дня для них — может быть не самым лучшим периодом. Разумеется, при составлении расписания невозможно сделать так, чтобы каждый мог работать в наиболее благоприятное для себя время. Появившееся недавно нововведение — скользящий график — позволяет в какой-то мере решить проблему выбора оптимального рабочего времени для каждого работника.

Сбой ритмов и стрессовые состояния гораздо быстрее возникают при сменной работе. В некоторых отраслях промышленности (например, в металлургии, химической промышленности, энергетике) процесс производства непрерывен и требует двух- и даже трехсменной работы. Любая сменная работа приводит к сдвигу фаз между ритмами, что само по себе еще не создает проблемы, поскольку организм способен адаптироваться к изменившимся ритмам окружающей среды. Плохо, если адаптация к новым ритмам происходит не до конца. Причин для такой неполной адаптации немало. Если режим работы изменяется часто и каждый раз всего на несколько дней, то организм не успевает приспособиться к новым условиям. Пожалуй,

самая важная причина неполной адаптации состоит в том, что вместе с графиком работы не меняются циклы социальных синхронизирующих факторов. Общение в семье, график работы магазинов, учреждений, кинотеатров требуют от тех, кто работает по ночам, чтобы они, передохнув, приспособивались к ритму жизни тех, кто работает днем. Создание условий для спокойного сна в дневное время сталкивается с множеством проблем, особенно в домашнем хозяйстве, где многое необходимо успеть сделать именно днем.

Все это мешает большинству ритмов приспособиться к работе по скользящему графику. Кроме того, около 2 часов ночи температура тела, физическая и умственная работоспособность достигают минимума. Это необходимо иметь в виду: к оценке производительности труда в дневное и в ночное время недопустимо подходить с одной и той же меркой. В тех случаях, когда расслабиться нельзя и требуется держать себя в постоянной готовности (такова, например, работа врача, различного рода наблюдателей и т. д.), на посту, сменяя друг друга каждые несколько часов, должны находиться несколько людей. Ведение записей в дежурном журнале с отметками о времени выполнения той или иной опе-



рации также способствует мобилизации внимания и не дает человеку заснуть. Тем не менее человек не может полностью приспособиться к нарушенному суточному режиму.

**Дальние путешествия.** Десинхронизация, вызванная дальними путешествиями, затрагивает относительно мало людей. Реактивные самолеты, летающие по параллелям, то есть под прямым углом к меридианам, за сравнительно небольшой отрезок времени переносят пассажиров через несколько часовых поясов. В отличие от наших предков, путешествовавших по морям и по суше крайне медленно, современный человек на борту воздушного лайнера не успевает приспособиться к новому местному времени.

На людей, прибывающих в государство, лежащее за «тридевять» земель, внезапно обрушивается многочасовой сдвиг фаз. Ритмы человеческого организма лишь постепенно и, что важнее всего, не одновременно приходят в соответствие с местным временем. Несколько суток прибывший из дальних мест переживает стрессовое состояние, неприятные ощущения, быстро утомляется, становится раздражительным, у него все валится из рук. Разумеется, если речь идет о туристах, жадно вбирающих впечатления от чу-

дес незнакомого края, то свежие впечатления, радость от возможности повидать мир смягчают неприятные последствия резкого сдвига фаз, и любители путешествовать, несмотря на все тяготы многочасового сдвига фаз, нередко чувствуют себя превосходно. Иное дело — спортсмены и артисты. То, что они делают, может доставлять многим миллионам людей удовольствие или приносить огорчение. Поэтому такая категория путешественников обычно стремится прибыть на место будущих встреч заранее, чтобы успеть освоиться в новых условиях. На адаптацию рекомендуется отводить 6–7 суток. Но стоит нам по туристской путевке попасть в город, расположенный далеко на западе или на востоке от наших родных мест, как мы, позабыв о всех наставлениях, стремимся в первый же день побывать во всех музеях, осмотреть все достопримечательности, отвлечься от того, чем заполнены наши будни, и до края наполнить первый день пребывания в чужом городе прогулками и развлечениями.

**Индивидуальные различия в чувствительности.** Десинхронизация может наступить и при нормальных внешних синхронизирующих факторах, если способность организма реагировать на эти факторы по

каким-то причинам изменилась. Устойчивость различных суточных ритмов неодинакова. Регулируя извне, легче всего поддерживать 24-часовой цикл, а остальные при этом сдвигаются.

Нередко у людей пожилого возраста ослабевает способность к синхронизации ритмов под действием социальных факторов, что приводит к расхождению ритмов. Десинхронизирующее действие может оказать и заболевание какого-нибудь органа, выполняющего важную функцию во внутренней временной регуляции.

Интересные данные о различиях в способности некоторых биологических ритмов поддаваться регуляции извне и об их индивидуальных различиях у разных людей были собраны во время исследований на острове Шпицберген. Поскольку этот остров расположен далеко за Полярным кругом, летом солнце над ним не заходит. Ни по температуре, ни по освещенности между ночью и днем в летние месяцы особых различий на Шпицбергене не наблюдается.

Исследования проводились над группой лиц сначала на Шпицбергене, а затем были продолжены в Англии в условиях нормального отношения свет — темнота. Изучались ритмы колебаний температуры и выведения мочи. На Шпицбергене испытуемых добро-

вольцев поселили в трех изолированных друг от друга палатках и каждой группе вручили наручные часы. У одной группы они показывали правильное время, у двух других либо отставали, либо спешили на 3 часа в сутки, о чем никто из обитателей палаток, разумеется, не знал. Задача испытуемых состояла только в том, чтобы жить по своим часам и терпеливо выдерживать все процедуры, которые с ними проделывали исследователи. Через каждые 2–5 часов у них собирали мочу и измеряли температуру. В тех палатках, где часы шли неверно, ритмы сон–бодрствование и изменений температуры быстро приспособились к 21- и 27-часовым циклам. Ритм выведения мочи у одних быстрее, у других медленнее также вышел на новый период. Наиболее стабильным оказался ритм выведения калия с мочой, но и он изменился.

Важные индивидуальные отклонения наблюдались не только в быстроте перестройки ритмов, но и в связанной с ней или не зависящей от нее чувствительности к стрессовым факторам. Именно поэтому, несмотря на обширные наблюдения над вредными для здоровья последствиями десинхронизации у работающих в ночное время, до сих пор не удалось получить таких однозначных данных, как при на-

блюдении над животными. Тем не менее можно утверждать, что частые и длительные десинхронизации повышают вероятность заболеваний системы кровообращения, а также вызывают различные нарушения в работе органов пищеварения.

У животных нарушение нормальных ритмов приводит к сокращению продолжительности жизни. Если мух *Phormia terrae novae* содержать при отношении свет–темнота 12 : 12, то средняя продолжительность их жизни составит 125 суток. Если же фазу ритма свет–темнота еженедельно изменять на 6 часов, что соответствует перелету через океан, то средняя продолжительность жизни мух сократится до 98 суток. Следует сказать, что и процент смертности мышей, у которых еженедельно менялась фаза ритма свет–темнота, значительно превышал обычный уровень.

### **Ритмы с более длинными периодами**

Существование суточных ритмов у человека однозначно доказано. С меньшей определенностью можно говорить о существовании у человека какого-либо цикла с более длинным периодом, который обладал бы такими же свойствами, как аналогичные циклы у растений и животных.



Так, для морских организмов характерны прежде всего ритмы, связанные с Луной; у растений и животных, обитающих на суше, бросаются в глаза годовичные циклы размножения, линьки и т. д. Однако человеку не нужно приспосабливаться к движению приливов и отливов. Тем не менее некоторые ученые считают, что нельзя полностью исключить существование лунного цикла у человека. Методика получения результатов, позволяющих высказать такую гипотезу, довольно спорна: ведь речь идет о колебаниях весьма малой амплитуды, существование которых удастся установить лишь сложными статистическими методами. Сомнительно, чтобы адаптация к такого рода колебаниям имела какой-нибудь физиологический смысл.

В связи с колебаниями, имеющими более длинный период, чаще всего упоминают циклическое функционирование женских половых органов. Этот цикл представляет большой интерес потому, что механизм гормональной регуляции хорошо известен. Обширный материал, собранный исследователями, позволил устано-

вить, что менструальный цикл длится 29,5 суток, то есть почти совпадает с периодом лунного месяца, равным в среднем 28 суткам.

Можно с уверенностью утверждать, что менструальный цикл отличается от обычных ритмов, регулируемых внешними синхронизирующими факторами. Если бы этот цикл принадлежал к числу таких ритмов, то у всех женщин, проживающих в данной местности, менструации происходили бы одновременно. Вполне возможно, однако, что некогда существовал какой-то ритм, для которого синхронизирующим фактором были светлые ночи в полнолуние, но с расцветом цивилизации синхронизирующее действие лунных ночей постепенно исчезло. Остатки цикла при желании можно усмотреть лишь в слабых лунно-месячных колебаниях числа рождений и в средней продолжительности менструального цикла. Эта гипотеза подтверждается тем, что у всех обитающих на воле высших приматов менструация наступает в новолуние, а овуляция — в полнолуние.

## Мода – да, но наука ли?..

Немецкий врач Вильгельм Флисс еще в начале века заметил, что у его пациентов, в первую очередь у детей, некоторые заболевания повторяются с правильной периодичностью. Эту периодичность нельзя было объяснить ни структурой недельного расписания в учебных заведениях, ни факторами иного рода. Флисс приступил к подробному исследованию, скрупулезно регистрируя время заболевания и смерти (если спасти больного не удавалось), а также даты рождения пациентов.

На основе собранных им данных Флисс обнаружил, что у всех людей с момента их рождения действуют два ритма: 23-суточный физический и 28-суточный эмоциональный. Именно от этих ритмов зависит вероятность заболевания или наступления смерти.

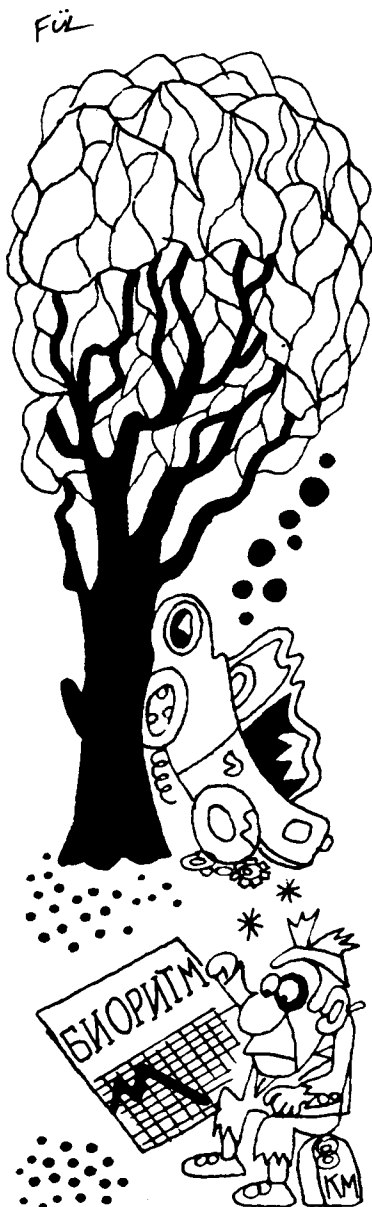
К аналогичным выводам пришел и венский психолог Герман Свобода, проводивший свои наблюдения также в начале века. Занимаясь психо-

анализом, Свобода обратил внимание на то, что способность пациентов реагировать, проявлять эмоции подвержена ритмическим колебаниям, аналогичным ритму сон – бодрствование. Как и Флисс, Свобода стал исследовать вероятность заболевания различными болезнями и независимо от своего немецкого коллеги открыл существование циклов с периодами в 23 и 28 суток, которые он назвал соответственно мужским и женским циклами. Колебаниям с 23-суточным периодом подвержены такие проявления человека, как храбрость, стойкость, воля, физическая сила, колебаниям с 28-суточным периодом – чувствительность, эмоциональная возбудимость, интуиция.

Физический и эмоциональный ритмы были предметом ожесточенных споров еще в двадцатых годах нашего века. Начало дебатам положил инженер из Инсбрука Фридрих Тельчер. Анализируя результаты экзаменов в высшем учебном заведении, где он пре-

подавал, и сопоставляя оценки с датой рождения экзаменуемых, Тельчер установил, что успехи студентов колеблются с 33-суточным периодом.

Итак, у каждого человека наблюдаются три ритма — *физический* (с периодом 23 суток), *эмоциональный* (с периодом 28 суток) и *интеллектуальный* (с периодом 33 суток), — начальные фазы которых совпадают с моментом его рождения. Любой из периодов каждого из этих трех циклов можно разделить на две равные части: первая часть называется *положительным полупериодом*, вторая — *отрицательным полупериодом*. Находясь, например, в положительном полупериоде физического ритма, мы ощущаем прилив сил, наша работоспособность повышается, мы легко справляемся с заданиями, требующими таких физических усилий, которые в отрицательный полупериод, скорее всего, были бы нам не по силам. В так называемые *критические дни* циклы «меняют знак», то есть происходит смена полупериодов. Какой именно переход происходит — из положительной фазы в отрицательную или наоборот, несущественно. В критические для данного человека дни функции, входящие в «сферу действия» соответствующего ритма, достигают минимума. Особенно опасно, когда совпадают критические



дни двух и тем более всех трех ритмов.

Правильная периодичность этих ритмов позволяет по известной дате рождения человека заранее вычислить его критические дни. В такие дни человеку не остается ничего другого, как обходить опасные места, воздерживаться от принятия решений, с особой осторожностью относиться к ситуациям, в которых организм подвергается тем или иным испытаниям. Таким образом, теория, о которой идет речь, в какой-то степени предостерегает от капризов судьбы или по крайней мере уменьшает риск, смягчает вред, наносимый «несчастливыми» днями.

Сейчас уже трудно установить, при каких обстоятельствах возникла эта теория. Можно лишь констатировать, что за несколько лет она совершила триумфальное шествие по всему миру. Предприимчивые дельцы быстро поняли, что новая теория в умелых руках способна приносить огромные барыши. На обывателя, верящего в астрологию и почитающего за откровение предсказания гороскопов, и широкую публику, интересующуюся оккультными «науками» из желания не отстать от соседа, обрушился нескончаемый поток книг, написанных глубокими «знатоками» и непревзойденными

«специалистами». Изданные многомиллионными тиражами, эти книги принесли немалый доход авторам. Вычисление ритмов также превратилось в серьезный «бизнес»: и в Европе, и в США появились люди, берущиеся за соответствующее вознаграждение определить для любого, кто к ним обратится, какими будут знаки ритмов в указанную неделю или месяц. Нам, живущим в эпоху ЭВМ, не приходится удивляться, что вскоре в продаже появились микрокалькуляторы, предназначенные для вычисления критических дней.

В некоторых странах теорию трех ритмов начали применять транспортные предприятия: водителей автобусов снимали с маршрутов в критические дни, особенно когда речь шла о дважды и тем более трижды критических днях. Число дорожно-транспортных происшествий действительно сократилось, но трудно утверждать со всей определенностью, будто это произошло только потому, что водители не работали в критические дни. Действительно, человеческая психика очень чутко реагирует на различные воздействия. Не исключено, что непривычность эксперимента и ощущение безопасности благоприятно сказались на водителях. Из врачебной практики хорошо известен эффект применения

плацебо: если больному под видом нового чудодейственного лекарства дать безвредную таблетку крахмала, то состояние больного во многих случаях улучшается (например, утихает головная боль), то есть все происходит так, как если бы таблетка действительно была лекарственной.

Подтверждение правильности этой теории имело бы грандиозное значение. Приведем лишь несколько примеров. В критические дни работники транспорта и представители опасных профессий имели бы дополнительный отдых, продавцам запрещалось бы становиться за прилавок, члены семьи были бы особенно внимательны и предупредительны друг с другом. Снизилось бы число несчастных случаев, прекратились бы ссоры, жизнь стала бы легче.

Однако собрать на основе проводимых исследований статистически достоверные данные, подтверждающие правильность теории трех ритмов, очень трудно. Результаты этих исследований всегда удивительно хорошо подкрепляют точку зрения их автора. Например, американский исследователь Х. Р. Уиллис на протяжении четырех месяцев изучал смертность населения в штате Миссури и обнаружил, что по мере введения современных методов лечения уровень смертности повышается.

Вывод, что и говорить, парадоксальный, но правильность его весьма сомнительна, поскольку сделан он на основе всего лишь 200 смертных случаев. Тем не менее Уиллис установил, что 112 из 200 человек умерли в критические дни своего физического или эмоционального ритма. Интеллектуальный ритм во внимание не принимался. Австралийские исследователи подвергли анализу 100 случайно выбранных автомобильных катастроф. Учитывая лишь те из них, в результате которых погибал шофер машины (?!), исследователи пришли к выводу, что в 54% случаев катастрофы произошли в критические дни водителей. Полученный вывод был проверен на большом числе случаев. Совпадение с критическими днями имело место. Тем не менее результаты исследования вызывают сомнение, поскольку в опубликованном отчете ничего не говорится ни о методике отбора данных, ни о способе их статистической обработки.

И все же ученые не торопятся опровергать теорию этих трех ритмов, хотя она и не имеет под собой прочной основы. Их нерешительность объясняется прежде всего проблемой выбора статистически достоверного числа случаев, обычно лимитируемого теми или иными причинами. Проанализируем, например, фи-

нальные бои на чемпионате мира среди боксеров тяжелого веса за последние 20 лет. Рассчитав физические, эмоциональные и интеллектуальные ритмы участников боев, мы установили, что между исходами поединков и критическими днями (или отрицательными полупериодами) боксеров никакой зависимости нет. К аналогичным выводам пришли исследователи, изучавшие ритмы и спортивные достижения американских баскетболистов.

Еще больше несоответствий возникает в связи с расчетами ритмов знаменитостей: в этом случае подбор данных заведомо не случаен. Сторонники теории трех ритмов охотно рассматривают только те случаи, которые подкрепляют их позиции. Когда с известным голливудским киноактером Кларком Гейблом случился 5 ноября 1960 года инфаркт, один из американских специалистов по биоритмам обратил внимание на то, что сердечный приступ по времени совпал с критическим днем физического ритма актера, и предупредил, что следующий критический день наступит для кинозвезды 16 ноября. Предсказанию не придали особого значения, но 16 ноября у Кларка Гейбла произошел второй инфаркт и он скончался. Самое необычное в этой истории то, что глашатай теории

трех ритмов отважился вынести свое предсказание на суд широкой публики: как правило, сторонники этой теории стремятся избегать рискованных прогнозов о грядущих событиях в жизни знаменитостей, предпочитая задним числом объяснять уже случившееся с помощью своих циклов.

Эдит Пиаф почувствовала себя плохо во время концерта 20 февраля 1960 года и была доставлена в больницу с желудочным кровотечением. В этот день происходила смена полупериодов различного знака ее физического цикла. Разумеется, не следует упускать из виду, что дни, критические с точки зрения теории трех ритмов, могли быть критическими и по совершенно другим причинам. Сопоставляя приведенные нами разрозненные примеры, нетрудно прийти к выводу, что понятие «критический день», по-видимому, следовало бы расширить, включив в число «черных» дней не только дни, предшествующие критическим и следующие за ними, но и целиком отрицательные полупериоды циклов. Таким образом, ни малочисленные, как правило, не поддающиеся проверке данные, ни вырванные из исторического контекста примеры не позволяют сделать вполне определенный вывод о существовании физического, эмоционального и интеллектуального ритмов. Однако,

опираясь на известные свойства реально существующих биоритмов, кое-какие аргументы в пользу теории трех ритмов все же можно выдвинуть. К сожалению, они не имеют решающего значения, поскольку нельзя быть уверенным, что в нашем организме существуют лишь циклы, аналогичные по своим свойствам уже известным.

Любые периодические колебания отличаются «точностью хода» только в том случае, если существует какой-то синхронизирующий фактор. Отсутствие синхронизации проявляется в достаточно заметных индивидуальных отклонениях. Поскольку физический, эмоциональный и интеллектуальный ритмы протекают с постоянными и одинаковыми у всех людей периодами, какой-то сильный синхронизирующий фактор непременно должен существовать. Однако ученым пока не удалось обнаружить явление, которому можно было бы приписать роль всеобщего синхронизатора. Трудно объяснить, почему гипотетический сильно действующий синхронизирующий фактор допускает рассогласование по фазе циклов различных людей, иными словами, почему циклы зависят от дня рождения человека.

Можно предположить, однако, что физический, эмоциональный и интеллектуальный

ритмы относятся к числу не внешне-внутренних, а чисто внутренних ритмов и, следовательно, не нуждаются во внешней синхронизации. Если это действительно так, то остается загадкой, почему в процессе развития от младенца до взрослого человека (сопровождающегося основательной перестройкой всех систем организма) периоды ритмов не изменяются хотя бы на несколько дней. Ни один из известных внутренних ритмов не отличается такой точностью.

Существует ли связь между 28-суточным женским, или эмоциональным, циклом и *менструальным циклом*? Маловероятно, чтобы эти циклы были независимыми, поскольку эмоциональное состояние женщины в значительной степени связано с менструальным циклом. Если же между циклами существует связь, то как объяснить, что ритм месячных выделений крови обладает совершенно иными свойствами, чем эмоциональный цикл: не говоря уже о том, что у девочек, едва достигших половой зрелости, менструации происходят довольно бессистемно, у женщин пожилого возраста цикл также не отличается точностью наступления (по дням), и под действием самых различных причин (например, при простуде или повышении температуры) менструация может на-

ступить с задержкой на несколько суток.

И наконец еще одно соображение, последнее по счету, но не последнее по своему значению: ни один организм не может позволить себе роскошь иметь лишние органы или процессы. Это ослабило бы его шансы в борьбе за выживание. Все ранее рассмотренные нами циклы способствовали лучшему приспособлению организма к окружающей среде, то есть в конечном счете его выживанию. Что же касается этих трех, так называемых биологических, ритмов, то они, насколько можно судить, не несут такой функции. Сохранение регулирующего механизма (или даже механизмов), превосходящего по точности все известные механизмы, но бесполезного для человека, лишено биологического смысла и невыгодно.

Не исключено, однако, что ритм физического, эмоционального или интеллектуального состояний обусловлен периодическими колебаниями параметров каких-то других процессов.

Хорошо известно, что в ходе менструального цикла изменяются чувствительность организма к различным раздражителям, половое влечение, появляется головная боль. Как показали недавние исследования, *уровень тестостерона* (основного мужского поло-

вого гормона) в крови мужчин также колеблется в определенном ритме, период которого индивидуален и варьирует в весьма широких пределах (от 5 до 30 суток). Психологические методы исследования позволили установить, что эмоциональное состояние мужчины также подвержено колебаниям. Даже если бы эти циклы были общепризнанными и существование их не вызывало сомнений, мы не могли бы, опираясь на них, составить точные прогнозы, как не может ни одна женщина предсказать за год вперед, в какие дни у нее начнется менструация. Если физический и интеллектуальный циклы существуют, то сказанное, по-видимому, в полной мере относится и к ним.

Чтобы каждый мог проверить на себе выводы этой теории и убедиться в ее правильности или ошибочности, изложим кратко способы вычисления фазы каждого из трех основных ритмов. С их помощью любой желающий сможет за 10 минут установить, в какой фазе физического, эмоционального и интеллектуального циклов он находится, затем отметить в календаре критические дни и проверить правильность теории. Вычисления целесообразнее проводить *ретроспективно, назад по времени, чтобы исключить предвзятость в оценках:*



зная заранее, что какой-то день для нас критический, можно почувствовать в тот день особую усталость. Зная дату рождения какого-нибудь известного человека, можно определить фазы в знаменательные дни его жизни. Это также позволит проверить теорию. Необходимо лишь следить за тем, чтобы число лиц, на которых вы производите проверку, было достаточно большим, а их выбор — случайным (например, можно воспользоваться биографическим справочником).

Для метода вычисления фаз существенно, сколько целых периодов циклов прошло со дня рождения до интересующего нас дня: фаза циклов определяется *остатком* от деления числа дней, истекших со дня рождения до выбранного дня, на длину периода. Тот же принцип мы, по существу, используем, когда говорим, например, что 9-й день после понедельника совпадает с 3-м днем недели, то есть приходится на среду (при делении 9 на 7 частное равно 1, а остаток — 2; первый день недели — понедельник,  $1 + 2 = 3$  — третий день недели).

Для упрощения вычислений приведем таблицу остатков от деления числа полностью прожитых лет и числа полностью прожитых месяцев на период соответствующего цикла. Сложив эти остатки и

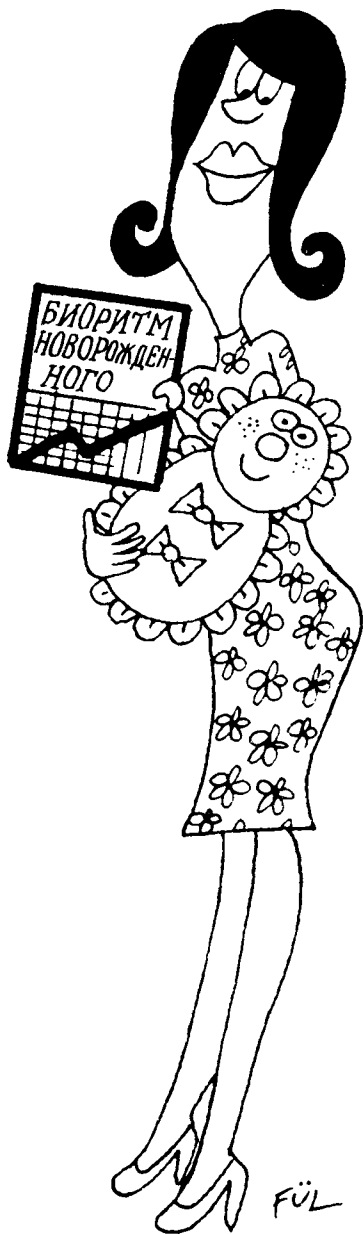


Таблица А. Остатки от деления числа полностью прожитых лет на период соответствующего цикла

Физический (23-суточный) цикл					Эмоциональный (28-суточный) цикл				Интеллектуальный (33-суточный) цикл			
Число лет		Остаток от деления			Число лет		Остаток от деления		Число лет		Остаток от деления	
1	24	47	70	<b>20</b>	1	29	57	<b>1</b>	1	34	67	<b>2</b>
2	25	48	71	<b>17</b>	2	30	58	<b>2</b>	2	35	68	<b>4</b>
3	26	49	72	<b>14</b>	3	31	59	<b>3</b>	3	36	69	<b>6</b>
4	27	50	73	<b>11</b>	4	32	60	<b>4</b>	4	37	70	<b>8</b>
5	28	51	74	<b>8</b>	5	33	61	<b>5</b>	5	38	71	<b>10</b>
6	29	52	75	<b>5</b>	6	34	62	<b>6</b>	6	39	72	<b>12</b>
7	30	53	76	<b>2</b>	7	35	63	<b>7</b>	7	40	73	<b>14</b>
8	31	54	77	<b>22</b>	8	36	64	<b>8</b>	8	41	74	<b>16</b>
9	32	55	78	<b>19</b>	9	37	65	<b>9</b>	9	42	75	<b>18</b>
10	33	56	79	<b>16</b>	10	38	66	<b>10</b>	10	43	76	<b>20</b>
11	34	57	80	<b>13</b>	11	39	67	<b>11</b>	11	44	77	<b>22</b>
12	35	58	81	<b>10</b>	12	40	68	<b>12</b>	12	45	78	<b>24</b>
13	36	59	82	<b>7</b>	13	41	69	<b>13</b>	13	46	79	<b>26</b>
14	37	60	83	<b>4</b>	14	42	70	<b>14</b>	14	47	80	<b>28</b>
15	38	61	84	<b>1</b>	15	43	71	<b>15</b>	15	48	81	<b>30</b>
16	39	62	85	<b>21</b>	16	44	72	<b>16</b>	16	49	82	<b>32</b>
17	40	63	86	<b>18</b>	17	45	73	<b>17</b>	17	50	83	<b>1</b>
18	41	64	87	<b>15</b>	18	46	74	<b>18</b>	18	51	84	<b>3</b>
19	42	65	88	<b>12</b>	19	47	75	<b>19</b>	19	52	85	<b>5</b>
20	43	66	89	<b>9</b>	20	48	76	<b>20</b>	20	53	86	<b>7</b>
21	44	67	90	<b>6</b>	21	49	77	<b>21</b>	21	54	87	<b>9</b>
22	45	68	91	<b>3</b>	22	50	78	<b>22</b>	22	55	88	<b>11</b>
23	46	69	92	<b>0</b>	23	51	79	<b>23</b>	23	56	89	<b>13</b>
					24	52	80	<b>24</b>	24	57	90	<b>15</b>
					25	53	81	<b>25</b>	25	58	91	<b>17</b>
					26	54	82	<b>26</b>	26	59	92	<b>19</b>
					27	55	83	<b>27</b>	27	60	93	<b>21</b>
					28	56	84	<b>28</b>	28	61	94	<b>23</b>
									29	62	95	<b>25</b>
									30	63	96	<b>27</b>
									31	64	97	<b>29</b>
									32	65	98	<b>31</b>
									33	66	99	<b>0</b>

прибавив к ним число дней, истекших от начала месяца до интересующего нас дня, мы получим полный остаток для соответствующего цикла. Как правило, полный остаток оказывается больше периода цикла, и перед «употреблением» его, возможно, придется 2 или 3 раза разделить на период цикла, прежде чем он станет меньше периода. Именно это число понадобится нам в дальнейшем.

Поскольку день рождения всегда является первым днем цикла, вычислив сумму  $1 + \text{соответствующий остаток}$ , мы получим фазу интересующего нас цикла (так же, как прибавив к 1 остаток от деления 9 на 7, получили, что на девятый день от понедельника наступает среда). При вычислении не следует упускать из виду еще одно важное обстоятельство. При составлении таблиц мы учитывали лишь обычные,

Таблица Б. Високосные годы от 1900 до 2016

	1940	1980
—	1940	1980
1904	1944	1984
1908	1948	1988
1912	1952	1992
1916	1956	1996
1920	1960	—
1924	1964	2004
1928	1968	2008
1932	1972	2012
1936	1976	2016

Таблица В. Остатки от деления числа полных месяцев, прожитых в год рождения

	Физический цикл	Эмоциональный цикл	Интеллектуальный цикл
Январь	12	26	4
Февраль	7	26	9
Март	22	23	11
Апрель	15	21	14
Май	7	18	16
Июнь	0	16	19
Июль	15	13	21
Август	7	10	23
Сентябрь	0	8	26
Октябрь	15	5	28
Ноябрь	8	3	31
Декабрь	0	0	0

Таблица Г. Остатки от деления числа полных месяцев, прожитых в рассматриваемом году

	Физический цикл	Эмоциональный цикл	Интеллектуальный цикл
Январь	0	0	0
Февраль	8	3	31
Март	13	3	26
Апрель	21	6	24
Май	5	8	21
Июнь	13	11	19
Июль	20	13	16
Август	5	16	14
Сентябрь	13	19	12
Октябрь	20	21	9
Ноябрь	5	24	7
Декабрь	12	26	4

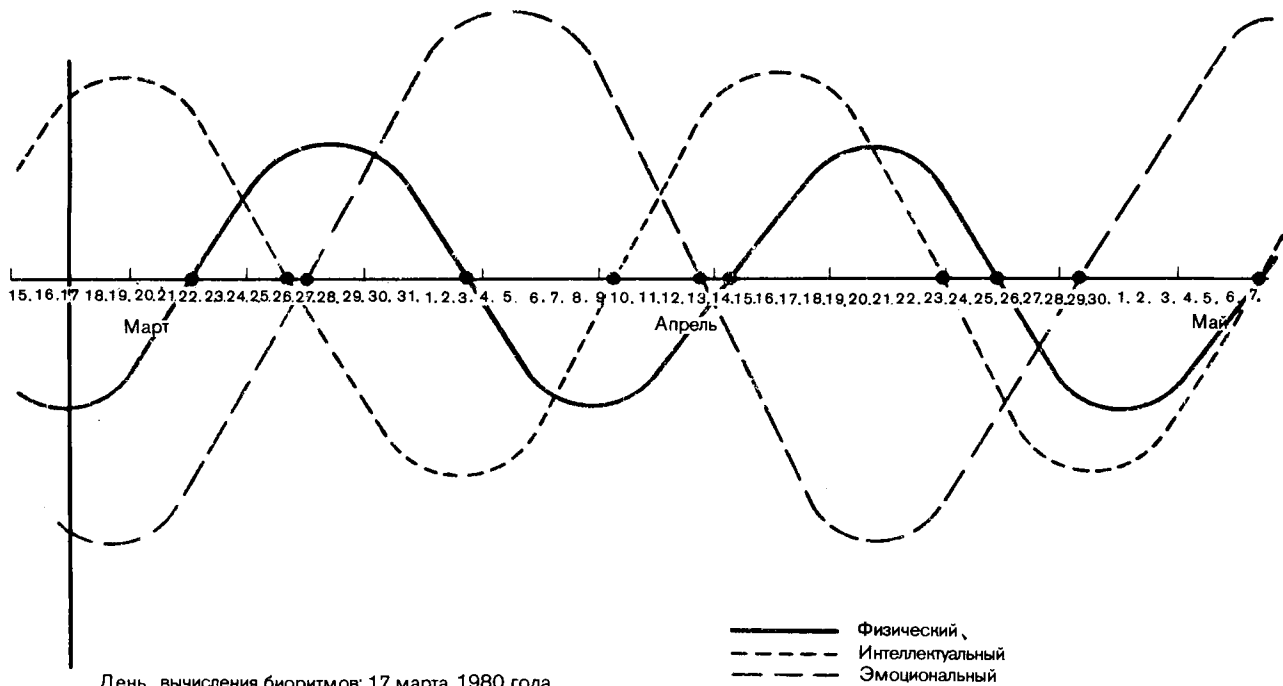
Годы. Число полностью прожитых лет:	Физический цикл	Эмоциональный цикл	Интеллектуальный цикл
1980 - 1952 = 28 - 1 = 27			
По <i>таблице А</i> находим остатки от деления Число високосных лет устанавливаем по <i>таблице Б</i> (речь идет лишь о полных годах, поэтому ни 1952, ни 1980 годы во внимание не принимаются)	11	27	21
<i>Месяцы.</i> Остаток от деления числа полных месяцев, прожитых в год рождения, находим по <i>таблице В</i> (то, что 1952 год - високосный, несущественно, так как, родившись в феврале, Пал Мадар прожил этот месяц не полностью)	6	6	6
Остаток от деления числа полных месяцев, прожитых в рассматриваемом году, находим из <i>таблицы Г</i>	7	26	9
Учитываем, что в интересующем нас году среди полностью прожитых месяцев имеется и февраль с 29 днями	13	3	26
<i>Дни.</i> В месяц, когда родился Пал Мадар, он прожил 29 - 20 = 9 дней	1	1	1
В том месяце, для которого мы рассчитывали фазу, Пал Мадар прожил 17 дней	9	9	9
	17	17	17
	64	89	89
После деления на длину периода получаем фактический остаток	64:23=2 18	89:28=3 5	89:33=2 23
<i>Фаза</i>	1+18= 19-й день	1+5= 6-й день	1+23= 24-й день

невисокосные годы. Следовательно, при вычислении остатков от деления числа полностью прожитых лет и полностью прожитых месяцев на длину периода необходимо каждый раз прибавлять число високосных лет, попавших в заданный промежуток времени (то есть учитывать, сколько раз наступало 29 февраля). Високосными считаются все годы, делящиеся на 4, за ис-

ключением тех, которые оканчиваются двумя нулями, но не делятся на 400 (например, 1800 или 1900).

Для примера вычислим фазы циклов некоего Пала Мадара (родившегося 20 февраля 1952 года) на 17 марта 1980 года.

Итак, мы установили, что 17 марта 1980 года Пал Мадар будет находиться в отрицательном полупериоде физиче-



Кривые биоритмов Пала Мадара с марта по май 1980 года.



ского и интеллектуального циклов и в положительном полупериоде эмоционального цикла. Действительно, эмоциональный цикл 17 марта 1980 года будет не слишком далек от своей *середины*, а два других цикла успевают далеко уйти от средней точки. Но по теории ритмов первостепенное значение имеет не близость к средней точке, а моменты, когда цикл изменяет знак. Имея под рукой календарь, нетрудно определить критические дни. Как правило, неизвестно, в каком часу родился человек, хотя явно не безразлично, появился он на свет в 2 часа ночи или в 11 часов утра. Предположим, что Пал Мадар родился в 12 часов дня; критическая точка, по-видимому, может на половину суток отклоняться от вычисленной нами как в одну, так и в другую сторону (то есть опережать или запаздывать).

Итак, первая критическая точка *физического* цикла приходится на 12 часов первого дня, то есть критический день совпадает с первым днем. *Середина* цикла располагается менее удобно, и 12-е сутки приходятся на 24 часа, то есть вторая половина 12-х суток и первая половина 13-х суток могут оказаться одинаково критическими. Критические дни *эмоционального* цикла приходятся на 1-е и 15-е сутки. Минимум *умственной работоспособности* приходится на 1-е сутки и

на вторую половину 17-х суток и первую половину 18-х суток. Возможно, почасовой расчет неблагоприятных фаз кое-кому покажется смешным, но по теории ритмов опасность представляют именно те моменты, когда циклы изменяют знак, а поскольку предсказать их можно лишь с точностью до полусуток, то и несколько часов могут иметь немаловажное значение. Действительно, за 20 лет физический ритм успевает пройти более 300 циклов и, следовательно, изменяет знак более 600 раз. Если каждый момент смены знака мы установим с неопределенностью всего в 1 час, то расхождение между истинным и вычисленным циклами составит несколько суток, причем отклонения могут быть как в сторону опережения, так и в сторону запаздывания. С особой точностью необходимо определять двойные и тройные критические дни.

Но вернемся к Палу Мадару и составим для него «прогноз» на основании проде-

ланных нами вычислений. Критическими днями для него будут 26 марта (эмоциональный цикл) и 27 марта (интеллектуальный цикл). По теории ритмов соседние критические дни столь же опасны, как и совпадающие. В апреле у Пала Мадара критические дни опять расположатся по соседству: на 12–13 апреля придется середина интеллектуального цикла, а 14 апреля наступит критический день физического цикла. Наконец, 7 мая будет критическим днем физического и эмоционального циклов. Пал Мадар поступит разумно, если в этот день останется дома и проведет трудные 24 часа для вящей безопасности в праздном безделье.

Аналогичный прогноз авторы без труда составили и для себя. Правда, мы не приняли всерьез собственные рекомендации и не стали менять своих планов, а главное в нашем авторском коллективе даже в критические дни пока не действует «право лентяя».

# Литература

- Aschoff J.* Circadian Clocks. Proceedings of the Feldfading Summer School 7–18 september 1964. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1965.
- Bünning E.* Die Physiologische Uhr. Springer Verlag, Berlin–New York, 1977.
- Lofts B.* Animal Photoperiodism. Edward Arnold (Publ.) Ltd., London, 1970.
- Marler P., Hamilton W.* Az állatok viselkedésének mechanizmusai. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 1975.
- Mletzko H. G., Mletzko I.* Biorhythmik. Die Neue Brehm-Bücherei. A. Zimsen Verlag, Wittenberg Lutherstadt, 1977.
- Palmer J. D.* An Introduction to Biological Rhythms. Academic Press, New York–San Francisco–London, 1976.
- Rensing L.* Biologische Rhythmen und Regulation. Grundbegriffe der modernen Biologie, Band 10. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1973.
- Дополнительная литература**
- Алякринский Б. С.* Биологические ритмы и организация жизни человека в космосе. *Проблемы космической биологии*, т. 46.–М.: Наука, 1983.
- Биологические ритмы (под ред. В. Б. Чернышева и А. Б. Рубина). *Проблемы космической биологии*, т. 41.–М.: Наука, 1980.
- Биологические ритмы (под ред. Ю. Ашоффа).–М.: Мир, 1984.
- Биологические часы.–М.: Мир, 1964.
- Гудвин Б.* Временная организация клетки.–М.: Мир, 1966.
- Доскин В. А., Лаврентьева Н. А.* Ритмы жизни.–М.: Медицина, 1980.
- Сифр М.* В безднах Земли.–М.: Прогресс, 1982.
- Слоним А. Д.* Экологическая физиология животных.–М.: Высшая школа, 1971.
- Соколов В. Е., Кузнецов Г. В.* Суточные ритмы активности млекопитающих. Цитологические и экологические аспекты.–М.: Наука, 1978.
- Степанова С. И.* Актуальные проблемы космической биоритмологии. *Проблемы космической биологии*, т. 23.–М.: Наука, 1977.
- Тыщенко В. П.* Физиология фотопериодизма насекомых. *Труды ВЭО*, т. 59.–М.: Наука, 1977.
- Уорд Р.* Живые часы.–М.: Мир, 1974.
- Чернышев В. Б.* Суточные ритмы активности насекомых.–М.: Изд-во МГУ, 1984.
- Эмме А. М.* Биологические часы.–Новосибирск: Наука, 1967.



## Послесловие к русскому изданию

Известно, что время как форма существования материи характеризуется длительностью и необратимостью и проявляется в последовательной смене событий (явлений) и состояний материи.

Для измерения времени обычно используют какое-нибудь повторяющееся, воспроизводимое явление. Так, стрелки часов повторяют круг за кругом свой путь по циферблату, периодически сменяют друг друга времена года и т. д. По определению авторов этой книги, ритм — это цепь повторяющихся в той или иной последовательности событий. Таким образом, биологический ритм, характеризующий повторяющуюся последовательность биологических процессов, можно рассматривать как форму проявления времени в живых системах. Продолжительность биоритма — длина периода — служит естественной единицей измерения биологического времени.

Основоположником концепции биологического времени по праву считается советский ученый академик В. И. Вернадский. За последние годы наши представления о биологическом времени значительно расширились и можно предполагать, что они помогут глубже разобраться в закономерностях существования организмов не только в пространстве, но и во времени. Биологические ритмы составляют существенный элемент временной организации живых систем.

Биоритмологию, как собственно учение о биоритмах, необходимо отличать от более

широкой области хронобиологии, занимающейся изучением роли фактора времени для биологических систем.

Среди множества понятий современной биоритмологии особое значение имеют два: среднее значение, или мезор, функции и фаза биоритма. Поэтому остановимся на них подробнее.

При оценке функции, заданной на каком-то отрезке, например периодической функции, рассматриваемой на длине одного периода, важно знать не значения, принимаемые функцией в отдельных точках (наибольшее или наименьшее, нули и т. д.), а некие интегральные характеристики, позволяющие судить о поведении функции на отрезке в целом. Одной из таких характеристик и является среднее значение, или мезор.

Среднепериодическая величина (среднее значение, принимаемое функцией за период) — важный параметр биологического ритма, позволяющий дать интегральную оценку биологического процесса за полный цикл его колебаний. Информации об отдельных значениях, принимаемых функцией, может оказаться недостаточно, в особенности если учесть способность биологических ритмов изменяться под влиянием внешних воздействий. Единственный способ избежать в этом случае получения неправильной информации — прибегнуть к вычислению среднего значения функции.

В биологическом ритме выделяют две основные фазы: активную и пассивную. Положение и длина активной фазы в биоритме

определяются тем интервалом его времени, на протяжении которого значения функции выше величины мезора, и, наоборот, пассивная фаза определяется тем отрезком времени, когда значения функции ниже величины мезора. Соотношения длин активной и пассивной фаз в разных биоритмах неодинаковы, но продолжительность активной фазы наряду с амплитудой ритма существенна для величины функции.

Активные фазы разных биоритмов могут располагаться (если, например, речь идет о суточных биоритмах) как в одно, так и в разное время суток. В некой живой системе ритмы биологических процессов в силу причинно-следственных связей протекают одновременно, поэтому и активные фазы ритмов этих процессов наблюдаются в разное время. Иными словами, между ритмами будет сдвиг фазы. Величина такого сдвига обычно варьирует, но в определенных пределах. Она является одним из основных параметров временной организации биологических систем, под которой понимают всю совокупность биологических ритмов живой системы, согласованных между собой по фазе, частоте и длине периода и определенным образом соотносящихся с периодическими колебаниями параметров внешней среды. Исследования последних лет показали, что временная организация наряду с пространственной является одним из общих принципов биологической организации.

В любом, даже относительно несложном, организме великое множество биологических ритмов. Их, по-видимому, столько, сколь-

ко в организме различных биологических процессов. В каком же соотношении друг с другом находятся эти разнообразные биоритмы и существует ли вообще какая-либо структура ритмической организации живых систем? Вопрос этот очень важный и очень сложный.

Каждая биологическая система для своего существования нуждается в связях с внешней средой (для обмена веществом, энергией и информацией), в структурах, осуществляющих регуляционные функции, и, наконец, в эффекторном звене, через которое и проявляется результат ее деятельности. В соответствии с этим общее строение временной организации любой биосистемы независимо от ее сложности должно, по-видимому, иметь то, что (1) связывает временную организацию данной биосистемы с другими биосистемами и с внешней средой, (2) регулирует временную организацию, (3) воспринимает сигналы регуляции и (4) включает биоритмы результирующей деятельности или поведения системы во времени.

Авторы книги много говорят о роли так называемых датчиков времени в протекании биоритмов. Хотя эта проблема изучается давно, в ней еще много неясного. Биологические колебания наблюдаются и в отсутствие какого бы то ни было влияния датчиков времени. В этом одно из серьезных доказательств эндогенного возникновения биоритмов. Хотелось бы только добавить, что если в качестве возможного механизма биологической регуляции считать механизм

с отрицательной обратной связью, то функционирование этого механизма неизбежно будет сопровождаться возникновением колебаний.

Большое внимание в книге уделено регуляции биоритмов со стороны организма. Авторы видят главный механизм их регуляции в наличии центральных биологических часов. На наш взгляд, присутствие в организме «центральных часов» — вещь далеко не очевидная. Само название «центральные» заставляет думать об этих часах как о некоем универсальном механизме или образовании (каковым является, например, универсальная химическая структура — ДНК или морфологическая структура — хромосома). В зависимости от сложности строения организма роль таких часов играют разные структуры, и уж совсем непохожими образованиями должны выглядеть «центральные часы» у животных и растений.

Внешние воздействия (например, датчики времени) регулируют биоритмы главным образом в направлении их подстройки к периодическим колебаниям факторов внешней среды. Это имеет исключительно большое значение в процессах адаптации организма и представляет собой важную связь между организмом и средой. Однако полученные в последние годы данные не оставляют сомнений в том, что биоритмы, как и другие свойства организма, контролируются геномом. В этом отношении особенно детально были изучены гриб нейроспора и плодовая мушка дрозофила, в хромосомах которых удалось локализовать гены, ответственные за те

или иные параметры биоритмов, главным образом за длину их периода. По мнению многих исследователей, биоритмы имеют полигенную регуляцию.

Авторы приводят пример, свидетельствующий о том, что в результате мутаций ритмы выхода дрозофил из куколок и их двигательной активности могут приобретать больший или меньший период; кроме того, мутации могут приводить к потере ритма. Было установлено также, что мутации, вызывающие исчезновение ритма двигательной активности у дрозофил, сопровождаются изменениями в нейросекреторных клетках их головного нервного ганглия. Эти данные приоткрывают конкретный путь влияния генома того или иного организма на его биоритмы. Можно ли регуляцию биоритмов геномом признать универсальной? Предположительно можно, хотя доказательства этому пока отсутствуют.

Приблизительно 15 лет назад была выдвинута мультиосцилляторная гипотеза возникновения биоритмов, объясняющая их появление взаимодействием большого числа осцилляторов (образований, обладающих колебаниями) в организме. Эта концепция отвечает фактической стороне дела, однако конкретные механизмы взаимодействия осцилляторов остаются малоизвестными.

Для понимания того, как может возникнуть биологическое колебание, очень важны данные о так называемых автоколебательных процессах в химических реакциях. Ингибирование продуктами химических превращений (механизмы с отрицательной об-

ратной связью) действительно может создать колебательный контур. Не это ли основа возникновения первичных периодических биологических колебаний, в частности метаболизма, которые затем включаются в цепь взаимодействия между собой и регулируются геномом? Быть может, это и есть «центральные биологические часы»? По крайней мере автоколебания, их взаимодействие и влияние на них генома и внешних факторов представляются достаточными для возникновения биоритмов и могут быть обнаружены у любого, как самого примитивного, так и самого сложного организма мира животных и растений.

Сами по себе сигналы регуляции, если они не будут уловлены и соответствующим образом реализованы, бесполезны для состояния биоритмов. Существует специальный аппарат восприятия регулирующих сигналов, который представлен рецепторными образованиями на клеточном уровне.

Биологические ритмы чувствительности клеток к действию различных веществ были установлены уже давно. И только в самые последние годы получены данные, объясняющие их существование: эти ритмы связаны с периодическими изменениями числа рецепторов в клетках организма, например числа рецепторов гормонов щитовидной железы и яичника в клетках печени крыс и мышей.

О роли, которую играют ритмические сигналы регуляции в возникновении и поддержании результирующих рабочих биоритмов, свидетельствуют данные,

полученные в экспериментах, проводившихся на перевиваемой асцитной опухоли Эрлиха (быстро растущий рак в брюшной полости) у мышей. Оказалось, что в формировании суточного ритма размножения клеток этой опухоли принимает участие внутритканевая (местная) система регуляции, которая вырабатывает специальные белковые вещества (кейлоны), препятствующие вступлению клетки в митоз. Было установлено, что выработка кейлона представляет собой ритмический процесс, ритмически изменяющейся была и чувствительность клеток опухоли к этому кейлону. Самое же интересное заключалось в том, что активные фазы этих ритмов совпадали по времени. Биологический смысл такого временного совпадения ритмов очевиден: достижение наиболее эффективной регуляции путем одновременного увеличения концентрации кейлона и чувствительности клеток к нему. Отсутствие в опухоли Эрлиха суточного ритма числа ДНК-синтезирующих клеток, как оказалось, связано с противофазным расположением ритмов выработки кейлона, запрещающего синтез ДНК, и ритмов изменения чувствительности клеток к нему.

Приведенный пример хорошо демонстрирует необходимость четкого временного согласования ритмов регуляции (выработки кейлона) и ритмов восприятия сигналов регуляции (чувствительности клеток к кейлону), чтобы на необходимом для организма уровне поддерживать «рабочие» биологические ритмы, одними из которых и являются ритмы размножения клеток.

Этот принцип относится к числу основополагающих в быстро развивающихся сегодня хронофармакологии и хронотерапии. Нет никакого сомнения в том, что применение лекарств с учетом биологических ритмов — один из главных путей совершенствования лечения болезней человека.

Общая и медицинская хронобиология уже сейчас занимает, например в нашей стране, около трети объема всех работ по изучению биологических ритмов. К числу комплексных научных разработок относится программа «Вахта», которая ставит своей целью выработать меры и рекомендации по охране здоровья людей, занятых вахтенным трудом в новых осваиваемых промышленных регионах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока.

В своей книге авторы рассказывают о получивших в последние годы широкую известность трех макробиоритмах: 23-дневном физическом, 28-дневном эмоциональном (психическом) и 33-дневном интеллектуальном. Явно сомневаясь в научной доказательности существования этих макробиоритмов, авторы назвали главу «Мода — да, но наука ли?..». Чтобы заинтересующиеся данной проблемой могли сами сделать соответствующие выводы, в книге приведены таблицы для расчета критических дней.

Надо сказать, что многие из опубликованных в последние годы работ, авторы которых пытались выявить зависимость различного рода происшествий от той или иной фазы макробиоритмов, не привели к ожидаемым результатам. И действительно, группа аме-

риканских ученых сопоставила данные более чем по четырем тысячам несчастных случаев в гражданской авиации с фазами этих ритмов, но достоверной корреляции частоты происшествий с критическими днями или с отрицательными фазами указанных циклов не обнаружила. Канадские исследователи, проанализировав несколько сотен несчастных случаев на горнорудных предприятиях, сделали вывод, что их число не увеличивалось в критические дни и в дни расположения кривых макробиоритмов ниже нулевой линии. Не исключено, впрочем, что в обоих упомянутых случаях и состояние организма работников не было решающим фактором происшествий.

Вопрос о наличии макробиоритмов у человека поднимался неоднократно. Одни исследователи считают, что их нет, другие допускают их существование, но критикуют принятую систему расчета критических дней и настаивают на более тщательном изучении макробиоритмов. В принципе нельзя не согласиться с последними.

В самом деле, не может быть никаких сомнений в наличии у человека ритмических колебаний различных функций с периодом 28 дней. Это — ритм, который коррелирует с циклом фаз Луны и который может быть назван лунным ритмом. Он, в частности, выражается в определенных изменениях, наблюдающихся в женском организме, но, по-видимому, свойствен и мужскому организму. Еще в 1925 году на это указывал русский ученый Н. Пэрна, имея в виду приступы

астмы, повторяющиеся у мужчин каждые 28 дней. Изменения, происходящие в организме с ритмом в 28 дней, проявляются в эмоционально-психической сфере, но не ограничиваются только ею. 28-дневный цикл у женщин сопровождается колебаниями в работе эндокринной системы, системы кроветворения, в работоспособности и т. д. Таким образом, есть все основания говорить о 28-дневном биологическом ритме как ритме, охватывающем многие функции человеческого организма, а не только его эмоционально-психическое состояние.

Признавая наличие в организме человека 28-дневного биоритма, нельзя не отметить, что уже давно известно, что, например, продолжительность менструального цикла у женщин далеко не всегда равна 28 дням. По данным Н. Пэрна, 28-дневный цикл наблюдается менее чем в 75% случаев; в остальных случаях длительность его колеблется от 23 до 45 дней. Кроме того, не следует забывать, что период этого ритма может изменяться при заболеваниях, стрессовых ситуациях и т. п. Поэтому весьма сомнительна правомерность использования в расчетах критических дней постоянной величины периода 28-дневного ритма.

Что определяет длину периодов у 23- и 33-дневного ритмов, остается пока неизвестным. Вполне возможно, что эти ритмы являются производными 28-дневного биоритма, как, например, считает советский исследователь Г. В. Рыжиков. Этому есть некоторые экспериментальные подтверждения. Так, получены дан-

ные, свидетельствующие о том, что, варьируя на протяжении суток режимами освещения в лаборатории, можно изменить периодичность окололунных циклов развития морского многощетинкового червя. В зависимости от тех или иных условий оказалось возможным удлинить этот цикл до 33 дней или сократить его до 21 дня. Но даже если 23- и 33-дневные ритмы представляют собой самостоятельные периодические изменения в организме, трудно согласиться с абсолютно постоянной величиной периода этих изменений на протяжении того или иного срока жизни человека (тем более со дня его рождения, что служит исходным для расчета критических дней). Это положение противоречит всем данным, которые на сегодня имеются в арсенале науки в отношении многих биоритмов, и прежде всего суточных. Если признать неизменность периода трех макробиоритмов, то этим ритмам надо отказать в выполнении той исключительно важной биологической роли, которую играют все другие биоритмы в процессах адаптации организма. Именно относительная изменчивость и постоянство биоритмов как раз и являются такими их свойствами, которые позволяют наиболее эффективно работать механизмам регуляции различных функций в организме.

Остается добавить еще несколько слов о методике выявления многодневных биологических ритмов. В подавляющем большинстве проводимых на эту тему работ состояние какой-либо функции организма человека в лучшем случае оценивается один раз в

сутки. Вместе с тем хорошо известно, что уровень очень большого числа (более 400) функциональных параметров человеческого организма ритмически изменяется на протяжении суток, причем эти суточные колебания могут иметь достаточно высокую амплитуду. Кроме того, по своему хронотипу люди неодинаковы. Мы уже знаем о разделении людей на предпочитающих работать во второй половине дня и вечером, часто до глубокой ночи, и на лучше работающих ранним утром и в первой половине дня. Из всего этого следует, что для оценки состояния организма человека необходимо привлекать среднесуточную величину того или иного функционального параметра, а не основываться на данных, полученных в какое-то время суток. Подобных работ по изучению физического, эмоционального и интеллектуального ритмов очень мало. В одной из них, выполненной болгарскими учеными, проводился учет среднесуточных величин физиологических показателей на большом материале (2400 случаев). Исследователи установили отсутствие зависимости между изменениями физиологических показателей человеческого организма и разными фазами его физического макробиоритма. В этой же работе указывается на отсутствие связи между производственными травмами и фазами всех трех макробиоритмов, а соответственно и критическими днями.

Нельзя не сказать и о том, что проводимая Л. Детари и В. Карцаги методика расчета трех макробиоритмов нивелирует индивидуальные особенности организма человека, индивидуальный характер течения биоритмов. Одна из главных задач современной хронобиологии человека как раз и заключается в выявлении этих особенностей, что, например, чрезвычайно важно при отборе лиц для выполнения ответственных заданий в малочисленном коллективе, находящемся в необычных условиях (в экипаже космического корабля и т. п.), и при разработке способов эффективного применения лекарств для лечения болезней человека.

Таким образом, вопрос о закономерностях течения трех макробиоритмов и значении их для жизнедеятельности человека требует дальнейшего изучения, а пока нет никаких оснований для прогнозирования состояния человека на основе этих ритмов.

Современная хронобиология все в большей степени становится основой развития фундаментальных проблем биологии и вместе с тем начинает играть все более важную роль в прикладных областях естествознания, прежде всего в медицине. Поэтому каждый, кто хоть сколько-нибудь интересуется проблемами жизни, должен осознать, что ритмические изменения биологических процессов представляют собой универсальное явление в живых системах.

*Ю. А. Романов*

# Содержание

<b>Предисловие редактора перевода</b> . . . . .	5	<b>Взаимодействие приливного и суточного ритмов</b> . . . . .	71
<b>Предисловие</b> . . . . .	9	<b>Часы, регулирующие ритмы</b> . . . . .	76
<b>Некоторые основные понятия</b> . . . . .	11	<b>Синхронизирующие раздражители, связанные с приливами и отливами</b> . . . . .	77
<b>Суточные ритмы</b> . . . . .	17	<b>Лунно-месячные циклы</b> . . . . .	81
<b>Движения растений</b> . . . . .	17	<b>Явления с годичным ритмом</b> . . . . .	85
<b>Важнейший из факторов — свет</b> . . . . .	19	<b>Регуляция ритмичности: изменение продолжительности дня и ночи</b> . . . . .	85
<b>Приспособление ритмов к среде: ритм, задающий фазу</b> . . . . .	20	<b>Организмы короткого и длинного дня</b> . . . . .	87
<b>Светочувствительность</b> . . . . .	23	<b>Механизм фотопериодической чувствительности</b> . . . . .	92
<b>Прекращение синхронизирующего влияния</b> . . . . .	24	<b>Связь с другими суточными ритмами</b> . . . . .	96
<b>Правило Ашоффа</b> . . . . .	26	<b>Годичные ритмы внутренней регуляции</b> . . . . .	98
<b>Второстепенные синхронизирующие факторы</b> . . . . .	28	<b>Ориентация с помощью часов</b> . . . . .	102
<b>Химические основы устойчивости ритмов</b> . . . . .	30	<b>Как пчелы ориентируются во времени и в пространстве</b> . . . . .	103
<b>Нечувствительность к температуре окружающей среды</b> . . . . .	32	<b>Возвращение к месту обитания</b> . . . . .	108
<b>Биологические часы в роли «сторожа у ворот»</b> . . . . .	34	<b>Сезонные миграции птиц</b> . . . . .	112
<b>Сколько же часов существует в организме: одни или несколько?</b> . . . . .	37	<b>Навигация почтовых голубей</b> . . . . .	115
<b>Обученная или наследственная ритмичность?</b> . . . . .	41	<b>Ритмы человека</b> . . . . .	117
<b>Где могут находиться часы?</b> . . . . .	46	<b>Условия наблюдения суточных ритмов</b> . . . . .	117
<b>Теория внешних и внутренних часов</b> . . . . .	46	<b>Наблюдения за циклом сон — бодрствование</b> . . . . .	118
<b>Трудно устранимые воздействия окружающей среды</b> . . . . .	50	<b>Температура тела и работоспособность</b> . . . . .	120
<b>Точные «суточные» биологические часы и неточные ритмы</b> . . . . .	53	<b>Ритм сердца как градусник</b> . . . . .	123
<b>Попытки локализовать внутренние часы</b> . . . . .	55	<b>Ритм деятельности почек</b> . . . . .	124
<b>Центральные часы животных</b> . . . . .	56	<b>Чувствительность к внешним воздействиям</b> . . . . .	124
<b>Представления о механизме часов</b> . . . . .	62	<b>Десинхронизация суточных ритмов</b> . . . . .	131
<b>Влияние Луны на жизнь на Земле</b> . . . . .	69	<b>Ритмы с более длинными периодами</b> . . . . .	136
<b>Влияние ритма, задаваемого движением Луны</b> . . . . .	69	<b>Мода — да, но наука ли?..</b> . . . . .	138
		<b>Литература</b> . . . . .	152
		<b>Послесловие к русскому изданию</b> . . . . .	153