

К ВОПРОСУ ОБ ИЛЛЮЗИИ ПОЛЕТОВ ВО СНЕ. МЕХАНИЗМ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

© 2023 г. Г.Р. Иваницкий*, #

*Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН,
ул. Институтская, 3, Пущино Московской области, 142290, Россия*

**E-mail: ivanitsky@iteb.ru*

Поступила в редакцию 03.07.2023 г.

После доработки 20.09.2023 г.

Принята к публикации 20.09.2023 г.

Показано, что для объяснения полетов во сне нет необходимости прибегать к экзотерическим гипотезам. С позиций биофизики феномен «полета во сне» основан на уже изученных адаптационных механизмах и суточных ритмах организма человека. Во время сна пороги возбуждения мозга изменяются, что облегчает в некоторых его областях возбуждение слабыми сигналами. Рассмотрен один из механизмов такого возбуждения при изменении позы человеком во время сна, воспринимаемый мозгом в быстрой фазе сна как уменьшение веса тела. Это при определенных условиях может способствовать в мозгу возникновению иллюзии полета.

Ключевые слова: самоорганизующаяся устойчивость биосистем далеких от равновесия, циркадные ритмы организма, чередование фаз сна со сновидениями и без них, понижение порогов возбуждения мозга в ночное время.

DOI: 10.31857/S0006302923050307, EDN: NBGZRJ

*Всякому, на первый взгляд, мистическому
явлению со временем найдется вполне
земное, биофизическое объяснение*

ЦИРКАДНЫЕ РИТМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На протяжении нескольких столетий исследователи пытались объяснить: почему в быстрой фазе сна у людей иногда возникает ощущение полета. Было выдвинуто много гипотез в попытках объяснить этот феномен. Можно с уверенностью утверждать, что все эти гипотезы основаны на предположениях, экспериментальные доказательства которых отсутствуют. Интернет сегодня засорен спекуляциями на эту тему [1–4]:

- наличием астральной души;
- генетической памяти о далеких предках, живших на деревьях и летающих с ветки на ветку подобно обезьянам;
- проявлением скрытых комплексов человека, т.е. тайных желаний властвовать и подавлять конкурентов;
- попытками выйти за рамки социальных ограничений и условностей, связанных с возникновением сексуальных проблем и т.п.

Сокращения: ЭЭГ – электроэнцефалограмма.

Нейрофизиологические исследования показывают, что кора нашего мозга и структуры подкорки – это органы, обрабатывающие информацию, поступившую по рецепторным каналам извне. С помощью нейронной активности они за счет роста дендритных связей формируют паттерны в нейронных сетях, и создает из них внутри мозга виртуальную модель внешней среды [5]. Фронтальная кора мозга и подкорковые структуры, прежде всего, гиппокамп и гипоталамус, участвуют в распознавании картин внешнего мира, выделяют их существенные признаки, обобщают полученную информацию путем ее сжатия, а результат обобщения запоминают. Работа мозга с этой виртуальной моделью позволяет обеспечить динамическую устойчивость организма в целом [6].

С позиции биофизики феномен «полета во сне» можно объяснить, опираясь при этом на экспериментально изученные циркадные ритмы нашего организма. Человек, как все живое, – это самоорганизующаяся система, далекая от равновесия, которая адаптирована к суточным изменениям параметров внешней среды (колебаниям температуры, давления и гравитационного поля Земли) [7]. Сегодня механизм появления циркадных ритмов в значительной степени изучен. Более того, в 2017 г. за открытие молекулярных ме-

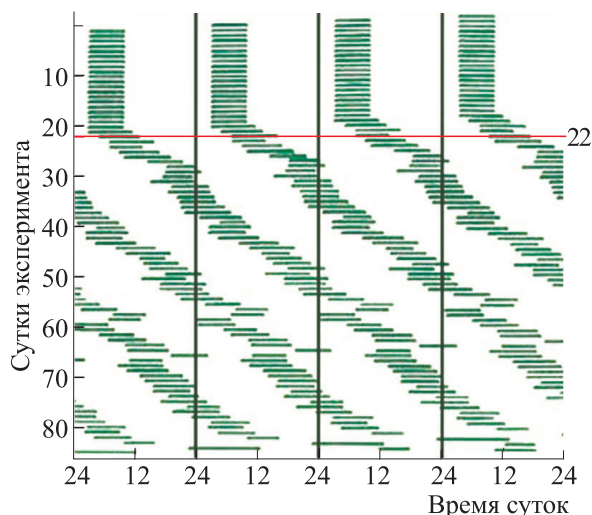


Рис. 1. Диаграмма суточной активности здоровых людей, изолированных от внешней среды. Диаграмма демонстрирует смещение длительности сна–бодрствования: темные полосы — это сон; светлое поле между ними — бодрствование. Смещение положения на шкале времени суток показаны сплошными линиями. Отклонение от суточного времени внешней среды начинает проявляться, усиливаясь, с 22 суток нахождения в бункере [7].

ханизмов, контролирующих циркадный ритм, трем исследователям — Джеффри Холлу (J. Hall), Майклу Росбашу (M. Rosbach) и Майклу Янгу (M. Young) — была присуждена Нобелевская премия [8].

Циркадные ритмы каждого человека индивидуальны и несколько отличаются от 24-часового

суточного ритма. Внешние условия (например, длительность дня и ночи) синхронизируют циркадный индивидуальный ритм человека с суточным 24-часовым ритмом внешней среды [9]. Диаграмма суточной активности человека в отсутствие внешних сигналов показана на рис. 1. Как только человек оказывается в темноте и изоляции, приблизительно на 22-е сутки эксперимента его часы перестают подстраиваться под внешний 24-часовой ритм. При этом выявляется собственный внутренний циркадный ритм человека, который немного отличается от 24 часов. Периоды сна (засыпание и пробуждение) приобретают характер свободного смещения, и каждый день, сдвигаясь, колеблются [7].

Изучение длительности колебаний ритма в группе из 157 человек показало, что:

- для всей группы их средняя длительность 24.15 ± 0.2 ч (24 ч 9 мин $\pm$ 12 мин);
- для женщин средняя длительность 24.09 ± 0.2 ч (24 ч 5 мин $\pm$ 12 мин);
- для мужчин средняя длительность 24.19 ± 0.2 ч (24 ч 11 мин $\pm$ 12 мин).

При этом период меньше 24 часов наблюдался у 35% женщин и у 14% мужчин. Однако не вся длительность сна сопровождается сновидениями.

Исследователи ритмов давно пришли к выводу о существенной роли в проявлении суточной ритмики не только нервной системы, но и эндокринной системы человека, т.е. изменения активности синтеза разного набора гормонов в течение суток (табл. 1)

Таблица 1. Изменение физико-химических параметров организма человека в течение суток

Часы суток	Показания физиологической и гормональной активности
7,5	Прекращение синтеза гормонов сна, прежде всего мелатонина
9	Наибольший синтез половых гормонов, прежде всего тестостерона
10	Наибольшая активность организма
14–15	Повышение реакции организма и координации движений
17	Наивысший мышечный тонус
18,5	Наивысшее кровяное давление
17–19	Наивысшая температура тела
21	Начало секреции гормонов сна, прежде всего мелатонина
22,5	Торможение работы кишечника
23	Максимальный синтез мелатонина
24	Секреция гормонов роста
2	Наиболее глубокий медленный сон
2–5	Наиболее низкая температура тела
6	Увеличение синтеза кортизола — гормона, который образуется в коре надпочечников. Этот гормон вызывает «стресс», эмоционально и интеллектуально мобилизуя организм на предотвращение чего-либо (дефицита пищи, финансов и т.п.). Порождает неприятные сны, проигрывая разные опасные ситуации и повышая энергетическую активность организма. Он связан с начальным этапом повышения температуры.

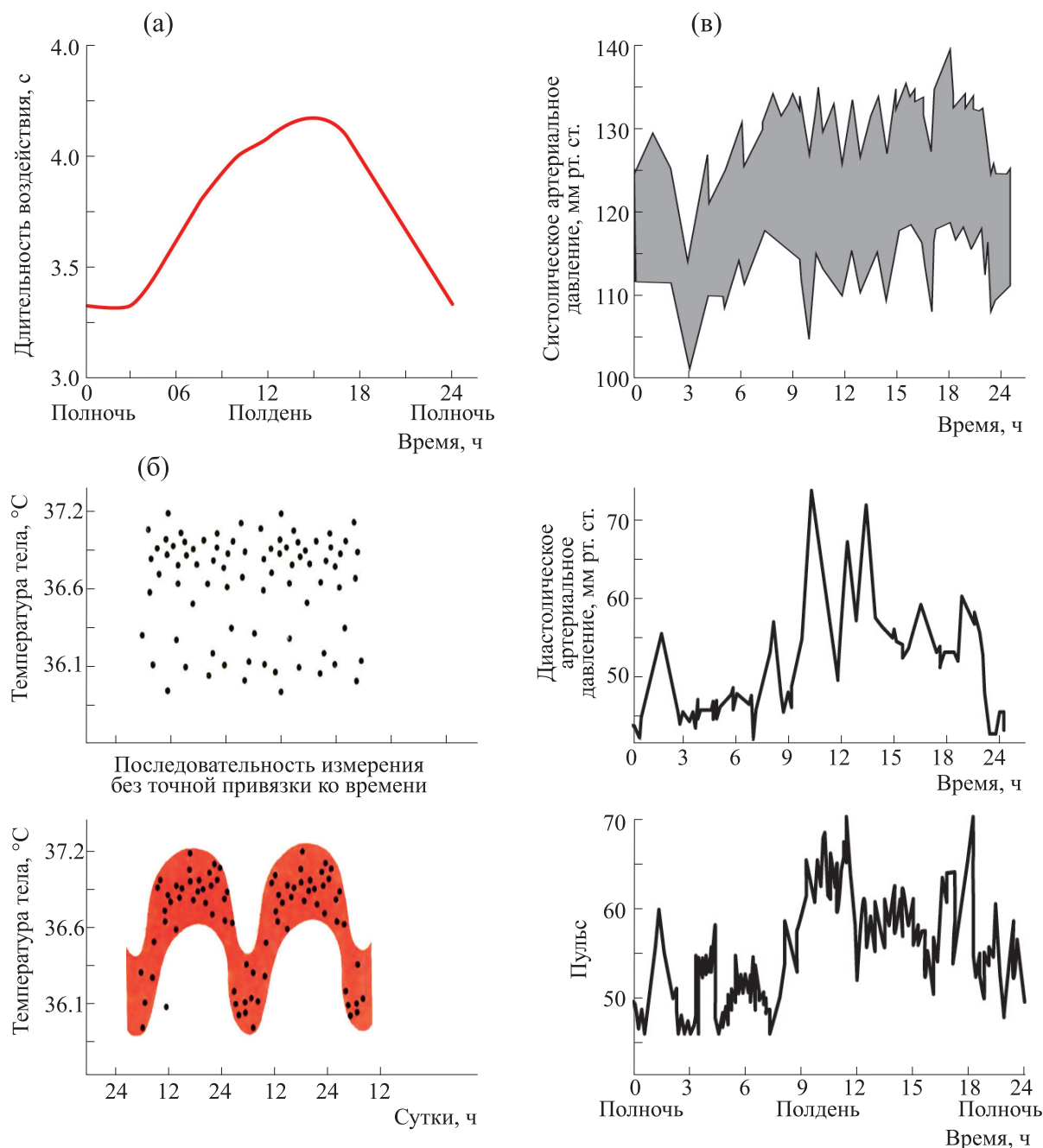


Рис. 2. Примеры влияния циркадного ритма на значение физиологических параметров человека: (а) — суточные изменения порогов чувствительности холодного воздействия; (б) — учет циркадного ритма при измерениях разбросов, на примере измерения температуры тела [7]; (в) — изменение величины артериального давления и пульса в течение суток здорового человека в зрелом возрасте.

Итак, интенсивность физиологических функций колеблется в течении суток. Если мы при измерениях не учитываем наличие циркадных ритмов, то получим в последовательности замеров почти хаотическую картину, в которой прослеживаются лишь верхние и нижние пределы. Например, во второй половине дня порог болевой чувствительности возрастает. В качестве примера на графике (рис. 2а) показано изменение порога бо-

левой чувствительности для холодного стимула [7]. Как видно из графика, самый большой порог приходится на день в 15 часов, а минимальный — на полночь. В дневное время необходим более продолжительный стимул, чтобы человек почувствовал воздействие.

Если температуру тела человека измерять без привязки ко времени суток, то мы получим близкое к нормальному распределение значений тем-

ператур (верхний график на рис. 2б). Если учитывать в процессе измерения фазу циркадного ритма, то значения температур расположатся в рамках этого ритма (нижний график на рис. 2б). Другой пример: самые низкие величины артериального давления находятся в пределах 3–5 часов ночи. В предутренние часы начинается подъем артериального давления и увеличение частоты пульса (рис. 2в).

Следует отметить, что в зрелом возрасте в памяти любого человека содержатся картины окружающего мира, воспринятые с высоты. Появление подобных картин связано с впечатлениями, полученными ранее, начиная с детского возраста. Эти картины человек мог наблюдать, находясь на горе, в кабине самолета, на воздушном шаре, через окно небоскреба или на фотографиях и в сюжетах кинофильмов. Запомнив эти картины, человек может многократно в течение жизни вызывать их из памяти (если они произвели на него сильное впечатление) и во снах воспроизводить их, пока к старости эти сюжеты не будут вытеснены из его памяти другими, более актуальными для его возраста картинами поздних впечатлений [10, 11]. Как происходит подобный процесс?

В быстрой фазе сна со сновидениями сюжет подобных картин может быть воспроизведен не только самовозбуждением структур мозга, но и спровоцирован внешними стимулами, похожими на те стимулы, которые в прошлом сопровождали запоминание этих картин. Такими стимулами могут быть звук, похожий на рев моторов самолета; запах травы, похожий для человека на тот запах, который он воспринимал, находясь на вершине горы; ощущение сквозняка, напомнившее порывы ветра на воздушном шаре; скачок давления после остановки скоростного лифта гостиницы-небоскреба, через окна которого человеку довелось в прошлом видеть заинтересовавшие его сюжеты жизни улиц города, наблюдаемые через окно с верхних этажей и т.д. В основе иллюзии полета во сне лежит совпадение фаз случайного внешнего раздражителя с фазой понижения порога возбуждения систем мозга, содержащих память о прошлых впечатлениях от картин, наблюдаемых с высоты.

Во сне все системы человека, включая мозг, работают с понижением порогов возбуждения. Исключение составляет зрение. В сновидениях канал зрения отключен от внешней среды, поскольку глаза закрыты веками. Однако при сновидениях глазные яблоки под закрытыми веками двигаются. Через зрительный канал человек в быстрой фазе сна наблюдает картины сюжетов, извлекаемые из своей памяти. Наводит порядок в своей памяти [12].

В силу понижения порогов для возбуждения сигналов в рецепторных каналах и в мозге ночью,

в быстрой фазе сна для возбуждения мозга достаточно слабые стимулы. Слабый внешний раздражитель может вызвать сильные последствия. Он может спровоцировать возникновение потенциала действия, который в свою очередь спровоцирует перенос медиатора от нейрона к нейрону. Достаточно возбудить по одному из каналов рецепции первичный нейрон сети памяти, а далее через него возбудится вся сеть ассоциативной памяти (Напомним, что ассоциативное обучение основывается на образовании связи (ассоциации) между двумя или более стимулами. В этом процессе существенная роль принадлежит гипоталамусу.). Если при этом возбуждающий стимул не прерывается некоторое время, то приходящие потенциалы действия будут продолжать запускать воспоминания. Если же сделать паузу в стимуляции, то катион Ca^{2+} затормозит возбуждение, сюжет сновидения прервется. При этом человек проснется, иногда сожалея (если сновидение имело позитивное содержание) о прерванном сне.

Поскольку вызвать иллюзию полета могут разные рецепторные системы – слух, обоняние, тактильность, сигналы вестибулярного аппарата, – далее мы для более детального объяснения этого процесса ограничимся лишь одним примером из области осязания – чувством барометрического изменения. Надеюсь, что из этого примера читателю станет ясен общий механизм возникновения иллюзии полета и при других стимулах.

Сосредоточимся на температурной суточной ритмике, поскольку она, с нашей точки зрения, наиболее полно отражает суточные изменения энергетики организма, легко регистрируется в эксперименте, которые часто определяют позу сна. Будет показано, что, например, динамика смены позы сна может спровоцировать иллюзию полета во сне. Здесь последовательно будут даны ответы на следующие семь вопросов.

1. Почему во сне температура тела снижается?
2. Почему человек засыпает чаще всего в позе «эмбриона»?
3. Как меняются фазы сна?
4. Как меняется давление опоры на тело человека при изменении позы во сне?
5. Какова во сне продолжительность сюжетов сновидения?
6. Как динамика смены поз провоцирует во сне иллюзию полета?
7. Какова роль зрения и осязания в полетах во сне?

Надеюсь, что после ответов на эти вопросы, читателю станет ясно, из чего и как складывается механизм, вызывающий виртуальное, т. е. иллюзорное, чувство полета во сне.

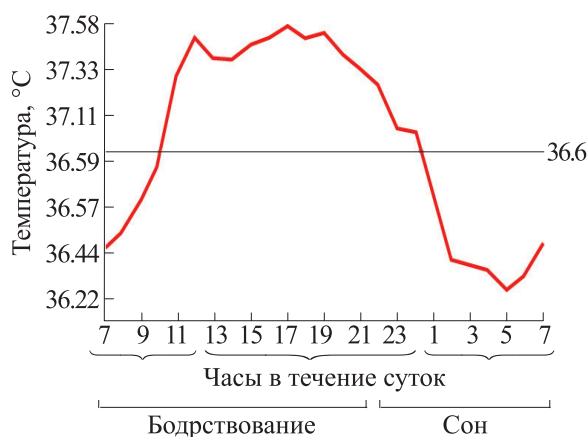


Рис. 3. Пример изменения в течение суток температуры тела одного из взрослых мужчины в зрелом возрасте [13.]

ПОЧЕМУ ВО СНЕ ТЕМПЕРАТУРА ТЕЛА СНИЖАЕТСЯ?

Из экспериментов известно, что средняя температура здорового взрослого человека в состоянии бодрствования наиболее часто равна в мышечной впадине 36.6°C , внутри тела — около 37°C . Однако в течение суток возникают отклонения в ту или иную сторону, нормальным для здорового тела в состоянии средней активности можно считать температуру под мышкой от 36.2°C до 37.3°C . Это зависит от индивидуальных особенностей организма. На температуру влияют пол и возраст. У девочек температура тела стабилизируется к 13–14 годам, а у мальчиков — примерно к 18 годам. Средняя температура тела мужчин примерно на $0.5\text{--}0.7^{\circ}\text{C}$ ниже, чем у женщин. К вечеру температура понижается, к утру повышается. Разница между утренней и вечерней температурой достигает $0.5\text{--}1.4^{\circ}\text{C}$ (рис. 3).

Н. Клейтман (N. Kleitman) в своей известной в XX веке книге «Сон и бодрствование» [14] отмечает: «...влияние сна на снижение температуры тела уже давно было предметом дискуссий. Никто не сомневается в том, что ночью температура тела уменьшается, и легко представить себе, что это результат отдыха в горизонтальном положении при расслаблении мышц. Однако тот факт, что температура начинает снижаться задолго до сна и совершает свой обычный суточный цикл, даже если человек бодрствует всю ночь, расценивали как указание на то, что сон — не прямая причина низкой ночной температуры».

Клейтман прав, отмечая, что «сон — не прямая причина низкой ночной температуры». Скорее наоборот, снижение температуры есть причина, провоцирующая человека занять горизонтальное положение и погрузиться в сон. Суточный ритм изменения температуры тела человека (как и других

физико-химических показателей организма) — это генетически зафиксированное естественным отбором явление в виде циркадного ритма [9]. Следуя суточному ритму, наиболее низкая температура тела (как показано на этом графике) отмечается утром, около 5–6 часов, а максимальное значение достигается вечером в 18–19 часов. Ритм изменения температуры следует суточному циклу вращения Земли, т.е. смены дня и ночи [15].

В ночное время суток биоритмы замедляются, во сне тело расслабляется и теряет активность. Сердце сокращается с частотой порядка 1 Гц (пульсация сердца 60–70 сокращений в минуту), иногда и с меньшей частотой, а частота дыхания у людей в возрасте 25–30 лет — в среднем 16 вдохов/выдохов в минуту, т.е. 0.06 Гц. Во время сна температура поверхности человеческого тела у женщин снижается до 35.7°C , у мужчин — до 35.1°C . Температурные различия между внутренними органами могут достигать нескольких десятых градуса. Разброс температуры внутренних органов, мышц и кожи может составлять до $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$ [16].

ПОЧЕМУ ЧЕЛОВЕК ЗАСЫПАЕТ ЧАЩЕ ВСЕГО В ПОЗЕ «ЭМБРИОНА»?

В начале XXI века было выяснено в какой позе люди проводят большую часть сна. Оказалось, что в изученной выборке людей 54% спят, лежа на боку, 37% предпочитают лежать на спине, а 7% — лежать на животе [17].

Человек не может спать стоя. Такая поза сна возможна лишь в условиях невесомости, например, на космической станции. На Земле вертикальное состояние требует постоянной поддержки устойчивости тела и является активным процессом. При этом задействованы мышцы ног, спинной и головной мозг и вестибулярный аппарат [18]. В вертикальном положении тела центр тяжести человека лежит на пересечении трех плоскостей, расположенных под прямым углом друг к другу: сагитальной, фронтальной и горизонтальной. Установлено, что центр тяжести при этих пересечениях, как правило, находится на 4–5 см выше поперечной оси тазобедренного сустава. В динамике при движениях и наклонах тела центр тяжести смещается. Если он выйдет за пределы вертикальной оси тела, а человек не успеет выдвинуть ногу, чтобы вернуть центр тяжести на вертикальную ось тела, то он упадет. Во сне мышечный аппарат расслабляется. Если человек уснет стоя, то при расслабленных мышцах под действием гравитационного поля Земли он начнет оседать и проснется.

Человек может спать сидя, но это не лучшая поза для сна. В этом случае туловище имеет опо-

Таблица 2. Площадь поверхности частей тела взрослого человека

Наименование частей тела	Показатель
Диапазон изменения суммарной площади поверхности кожи	1.5–2.4 м ²
Средняя суммарная (100%) площадь поверхности кожи	1.8 м ²
Средняя доля поверхности каждой ноги в суммарной площади поверхности кожи	18%
Средняя доля поверхности каждой руки в суммарной площади поверхности кожи	9%
Средняя доля поверхности головы в суммарной площади поверхности кожи	9%
Средняя доля поверхности туловища в суммарной площади поверхности кожи	37%

ру, но опора требуется и для головы. В отсутствие опоры ее наклоны из-за расслабления мышц шеи будут постоянно прерывать сон. Поэтому человек спит лежа, когда размер опоры определяется существенной частью поверхности тела, соприкасающегося с постелью. Величины поверхностей частей тела взрослого человека представлены в табл. 2.

Если температура окружающей среды выходит из зоны комфорта температуры тела, например, не превышает 20°C, то человек, раздеваясь, ложится, по сравнению с температурой своего тела, в холодную постель. Температура постели в силу термодинамического равновесия со средой равна температуре в комнате, например, 20°C. Чтобы согреться под одеялом, он автоматически принимает позу «эмбриона», при которой поверхность его тела, контактирующая с внешней средой, минимальна (рис. 4а).

По мере нагрева воздуха под одеялом спящий человек через несколько часов автоматически принимает другую позу. Если он предпочитает спать на животе, то это будет, например, поза «креста» (рис. 4б). Приращение поверхности контакта с постелью при переходе от позы «эмбриона» к позе «креста» у разных людей в зависимости от длины рук и ног может доходить до 55–57%.

Любого человека можно рассматривать как термодинамическую систему, которая получает энергию из продуктов питания, выполняет разную механическую работу и выделяет тепло во внешнюю среду. Если обратиться к первому закону термодинамики, то для поверхности кожи человека можно записать тепловой баланс в стандартной форме [19]:

$$M - W_{\min} = h_{CR}(T_0 - T_a) + h_E(e_0 - e_a)/g - R_{ni}, \quad (1)$$

где M – величина получаемой энергии с пищей, $W_{\min}$ – величина расхода энергии за счет механической работы организма, h_{CR} – объединенный коэффициент передачи потери температуры от тела путем конвекции воздуха и теплового излучения, T_0 – температура тела, T_a – температура воздуха, h_E – коэффициент потерь энергии телом за счет испарения воды (пота), e_0 – среднее давление пара на поверхности кожи, e_a – давление пара во внешней среде, g – психрометрический коэффициент, необходимый для того, чтобы размерности для h_E и h_{CR} были одинаковыми, т.е. [Вт·м⁻²(°C)⁻¹] [20], R_{ni} – радиационная энергия, которую поверхность тела поглотила дополнительно к энергии, излученной воздухом при определенной температуре, например, при засветке

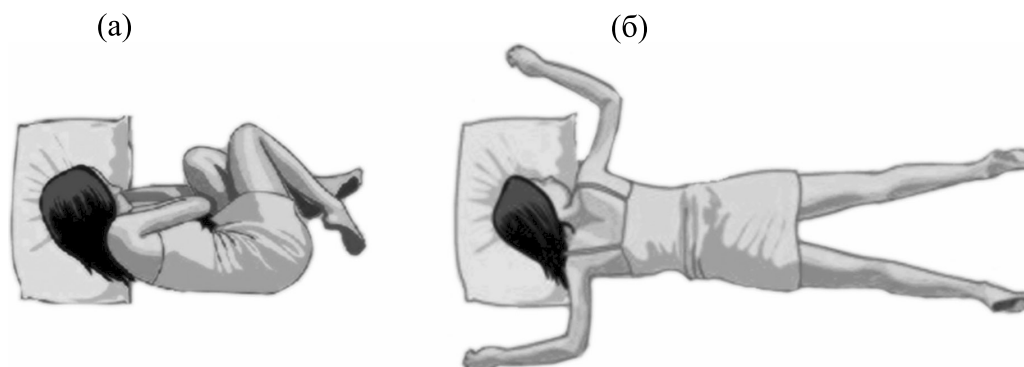
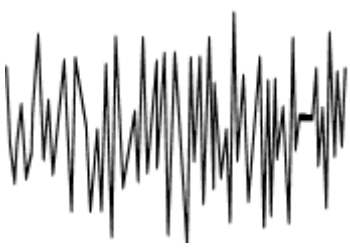


Рис. 4. Вид сверху на позу спящего человека: (а) – поза «эмбриона», (б) – поза «креста». Одеяло на рисунке не показано.

Таблица 3. Частота и форма ритмов электроэнцефалограммы человека и их отнесение к состояниям «бодрствование → сон»

Наименование биоритмов мозговых структур (колебаний/с)	Форма ритмов	Состояния мозга, отражаемые ритмом
Д(дельта)-волны 0.5–3.5 Гц 40–300 мкВ		При бодрствовании до 15% таких ритмов, также они имеются в фазе медленного сна.
Q(тета)-волны 4–7 Гц 40–300 мкВ		Естественный сон и начальная стадия фазы медленного сна
А(альфа)-волны 8–13 Гц 50–100 мкВ		Бодрствование в состоянии покоя
В(бета)-волны 13–30 Гц 5–20 мкВ		Бодрствование в состоянии тревожности при активной работе мозга, а также во сне на границе перехода от быстрого сна к медленному сну: при А→В, когда возникают сновидения

Примечание. В(бета)-волна по частоте больше Д(дельта)-волны в 13–28 раз, а по амплитуде — меньше в 8–15 раз, что связано с ускоренным перебором паттернов памяти во сне с небольшой затратой энергии при поиске решений задач, которые возникают в состоянии бодрствования.

части тела светом, Солнцем в утренние часы летом [21].

Короче, ложась вечером в холодную постель, человек автоматически принимает позу «эмбриона» и лежит неподвижно, пытаясь согреться. Ближе к утру, в 3–6 часов, он также автоматически, бессознательно, начинает ворочаться, сбрасывать одеяло, оголяя части тела, чтобы избежать перегрева и достичь комфортных для себя условий дальнейшего сна.

КАК МЕНЯЮТСЯ ФАЗЫ СНА?

Когда мы бодрствуем, происходит активное взаимодействие между одновременно активирующимися нейронными группами рецепторов. При этом связи между ними усиливаются. Спящий мозг перебирает и комбинирует образы, которые содержатся в его памяти. Эти образы есть отображение существенных и несущественных образов внешней среды, которые воспринял и за-

помнил мозг ранее в состоянии бодрствования. Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) отражает ритм этого перебора [12].

На вопрос, почему это происходит, ответ простой. За счет понижения во сне активности мышечных структур тела происходит уменьшение затрат энергии на подвижность организма, что приводит к перераспределению энергии в пользу мозга [22, 23]. По изменению ритмов ЭЭГ было замечено, что сон представляет собой чередование двух фаз — медленного и быстрого сна. Еще в первой половине XX века была создана классификация ритмов ЭЭГ человека и найдена корреляция ритмов ЭЭГ с разными стадиями бодрствования и сна [24] (табл. 3).

Анализ ЭЭГ демонстрирует взаимодействие нейронных кластеров. У здорового человека сон начинается с первой стадии медленного сна (Non-REM-sleep), т.е. сна без сновидений. Последовательность смены стадий и их длительность в физиологии обычно отображают графи-

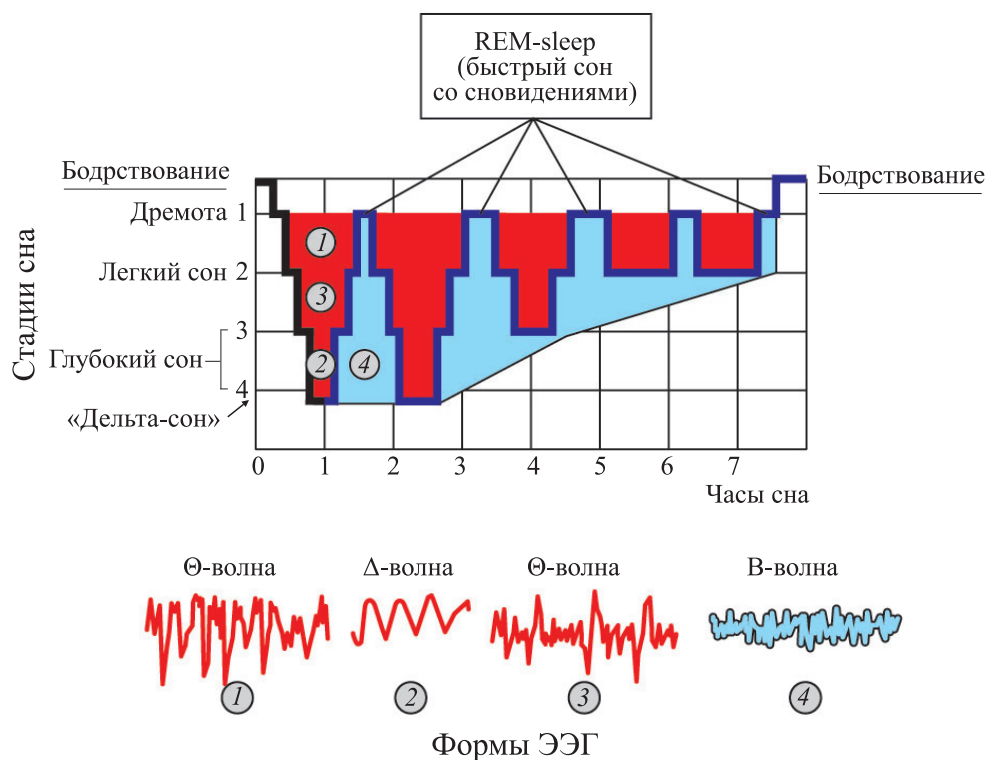


Рис. 5. Пример усредненной гипнограммы повторяющихся временных циклов фаз сна человека: медленный (красный) сон и быстрый (голубой) сон. Быстрый сон — это сон со сновидениями. ЭЭГ при быстром сне напоминает ЭЭГ бодрствования человека (бета-волны ЭЭГ), поскольку мозг активно работает [22].

чески в виде так называемой гипнограммы (диаграммы, содержащей информацию о структуре сна, качестве и количестве его стадий) [22] (рис. 5).

В стадии медленного сна существенно понижена мышечная активность и имеют место сравнительно постоянные и небольшие частоты дыхания и ритма сокращений сердца. Первый цикл медленного и быстрого сна имеет длительность порядка одного-трех часов. Затем циклы повторяются. При этом уменьшается доля медленного сна и постепенно нарастает доля быстрого сна (REM-sleep), т.е. сна со сновидениями. В среднем при полноценном здоровом сне отмечают порядка двух-пяти повторов двух фаз цикла.

Во время быстрого сна в мозгу человека нейроны продолжают работать, под закрытыми веками регистрируются движения глазных яблок. В фазе быстрого сна нейроны взаимодействуют почти также активно, как в состоянии бодрствования, хотя зрительные рецепторы под закрытыми веками отключены от внешней среды, мышечные системы тела практически обездвижены. В этой фазе сна телу трудно проявлять активность движения. Перед началом быстрой фазы сна мышечная активность возрастает, что позволяет человеку неосознанно менять позу тела.

КАК МЕНЯЕТСЯ ДАВЛЕНИЕ ОПОРЫ НА ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОЗЫ СНА?

В позе «эмбриона» поверхность контакта тела непосредственно с постелью минимальна, а в позе «креста» — максимальна (рис. 4). В общем случае статическое давление постели на тело p равно пределу отношения нормальной составляющей силы F_n к площади опоры s , на которую действует сила:

$$p = \frac{F_n}{s}. \quad (2)$$

При горизонтальном расположении постели нормальной составляющей силы является вес спящего человека G :

$$G = mg, \quad (3)$$

где m — масса человека, g — ускорение свободного падения. Подставим выражение (3) в выражение (2), получим величину статического давления:

$$p = \frac{G}{s} = \frac{mg}{s}. \quad (4)$$

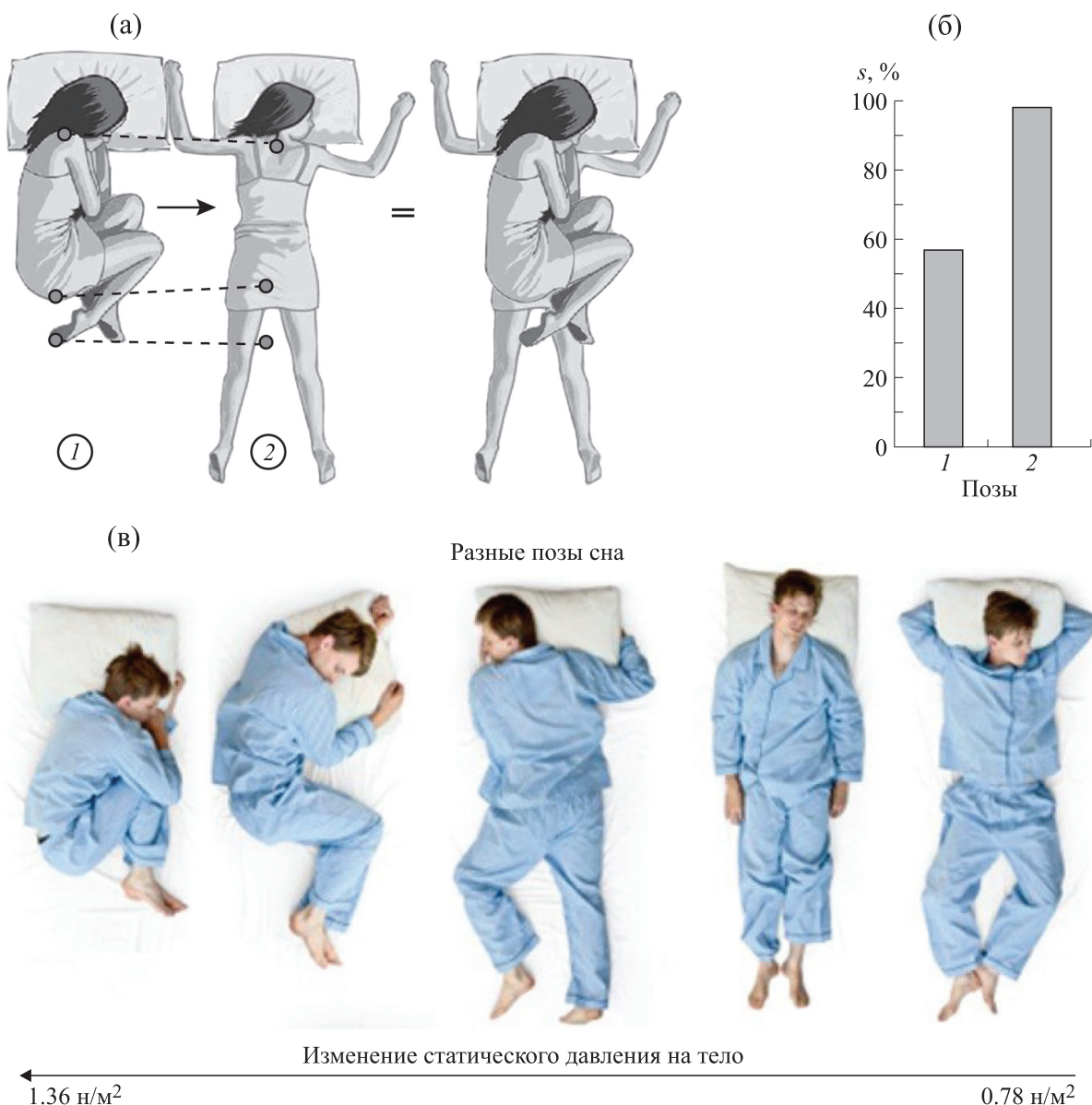


Рис. 6. Изменение поверхности тела, опирающейся на поверхность постели при разных позах сна: (а) — переход от позы «эмбриона» к позе «креста», (б) — этот переход может увеличить поверхность контакта с постелью до 55–57%. Очевидно, что может быть большое разнообразие поз, которые принимают спящие. На рис. (в) приведены лишь некоторые из них. Все они укладываются в указанный диапазон изменения статического давления на тело, если человек не страдает ожирением.

Из выражения (4) видно, что при увеличении площади опоры s , например, на 43% при переходе от позы «эмбриона» к позе «креста», статическое давление уменьшается. Примем массу человека 70 кг, поверхность его тела в среднем 1.8 м^2 . В позе «креста» половина (или более) поверхности тела человека контактирует с поверхностью постели, примем $s = 0.9 \text{ м}^2$. При этом поверхность тела, контактирующая с постелью в позе «эмбриона», будет равна 0.513 м^2 . Подставим эти значения в выражение (4), получим: диапазон изменения

статического давления составляет от 1.36 до 0.78 н/м^2 . В этом диапазоне находятся все позы сна (рис. 6).

Примечание: тот же самый результат уменьшения давления можно получить, если уменьшить ускорение g , например, приложив к системе всего организма ускорение a , направленное против вектора ускорения свободного падения, т.е.:

$$p = \frac{m(g - a)}{s}. \quad (5)$$

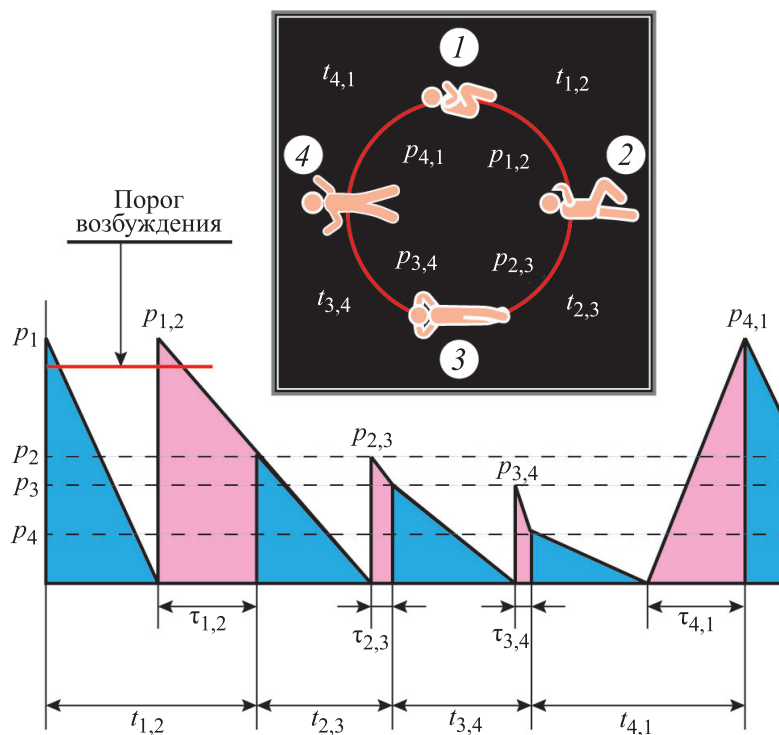


Рис. 7. Переходные режимы давлений и их характерные времена при последовательной смене поз спящим человеком. Синим цветом отмечены интервалы, соответствующие стационарным позам, красным цветом — интервалы, в которых с помощью мышечных усилий осуществляются повороты и смещения тела человека, меняющего позу. Если при смене позы изменение давления превысит порог возбуждения, регистрируемый тактильными (барометрическими) рецепторами кожи, то в затылочной области мозга, куда придет сигнал, начнется процесс распространения возбуждения по нейронным сетям.

Если ускорение a взять со знаком минус (т.е. торможение) и сделать его равным g , то давление на опору будет равным нулю, т.е. тело станет невесомым. В реальности в состоянии бодрствования на этом принципе основаны некоторые аттракционы, например, «американские горки» или «летающие люди в аэродинамической трубе». Возможно создание невесомости в самолете, который движется по параболе. Когда самолет пикирует вниз, то на 30–40 секунд в его салоне у пассажиров возникает невесомость, поскольку $a = g$. Такие полеты используются при тренировках космонавтов. Левитация¹ во сне человека невозможна, поскольку она возникает лишь при наличии внешней силы, компенсирующей вес.

Отличие потери веса, описываемой выражениями (4) и (5), состоит в том, что в первом случае

мы описываем изменение статического давления путем изменения поверхности контакта, во втором случае мы описываем динамическое изменение давления, компенсируя силу гравитации. Во сне в неизменной позе давление — статическое, при изменении позы во время поворотов тела оно становится динамическим.

КАКОВА ВО СНЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СЮЖЕТОВ СНОВИДЕНИЯ?

При смене позы «эмбриона», например, на позу «креста» центр тяжести человека описывает траекторию, определяемую поворотами тела. На рис. 7 показаны продолжительности переходных режимов t и изменения давления p при переходе из одной позы в другую позу. Если поза длительное время не меняется, то происходит адаптация организма к позе. Мозг человека перестает реагировать на статическое давление.

При смене позы ситуация меняется. Движущей силой человека при изменении положения его тела является мышечная ткань. Для мужчин нормальное значение мышечной массы — около

¹ Левитация (от лат. *levitas* — «легкость, легковесность») — преодоление гравитации, при котором субъект или объект летает в пространстве, не касаясь поверхности твердой или жидкой опоры. Левитация у людей как во сне, так и наяву невозможна. Демонстрация левитации человека в XVIII и в XIX веках в цирках — это один из фокусов, основанный на иллюзии, когда от зрителей маскируются веревки, компенсирующие вес тела человека.

45% от всей массы тела, для женщин — около 35% [25].²

Чтобы осуществить смену позы, часто необходимо повернуть тело на угол, равный в радианах $\pi/2$, а иногда требуется сделать и более существенный поворот — на $2\pi/3$. На повороты требуется затратить дополнительную энергию — сокращение мышц. При этом в мышцах используется энергия гидролиза АТФ. На анизометрическое сокращение, когда некоторые мышцы удлиняются, а другие сокращаются при повороте тела, требуется наряду с энергией и затрата времени. При одиночном сокращении у медленных мышц время укорочения лежит в диапазоне 40–50 мс, а у быстрых — в диапазоне 2.5–10 мс. На простую двигательную реакцию у молодого человека затрачивается порядка 150–200 мс. Чем большую массу требуется повернуть, тем больше затраты времени. В результате динамический переход может занять время не менее 2–8 с.

Что касается зрения, то анализатор сетчатки глаза может распознавать движение в картинах сюжета за время смены четырех-пяти картин. Например, частота смены кадров, принятых в современном кинематографе, в телевидении и в компьютерной анимации равна 24 кадра в секунду или 0.042 Гц, т.е. кадр занимает время 42 мс. Следовательно, времени 170–210 мс достаточно для восприятия сюжета как в состоянии бодрствования, так, по-видимому, и в сновидениях. Отсюда имеем, что за 2–8 с в сновидениях можно увидеть более 12 смен картин с разными сюжетами. Короче, сновидение может продолжаться недолго, а наше субъективное восприятие создает иллюзию его большой продолжительности.

КАК ДИНАМИКА СМЕНЫ ПОЗ ПРОВОЦИРУЕТ ВО СНЕ ИЛЛЮЗИЮ ПОЛЕТА?

Время вращения τ при смене поз зависит от шести параметров:

$$\tau = f(m, F_{\text{тр}}, \alpha, \mu, k, x), \quad (6)$$

где m — масса тела, $F_{\text{тр}}$ — сила вязкого трения, α — коэффициент, определяющий величину мышечной массы рук и ног в общей массе тела m , μ — коэффициент вязкого трения, k — коэффициент сокращения мышц рук ($k = ES$, E — модуль Юнга,

S — площадь поперечного сечения укорачивающихся мышц), x — длина пути смещения центра тяжести. Если, человек спит на досках без матраса, то трение будет близким к сухому трению. Если он спит на мягкой постели, то трение близко к вязкому трению.

Важно отметить, что для вращения верхней части массы тела задействованы в основном мышцы рук, а нижней части — мышцы ног. По высоте спинного мозга и в моторных их представительствах в коре головного мозга местоположения управления конечностями (руками и ногами) различаются. Поэтому условно туловище можно разделить на две отличающихся характером движения части — верхнюю и нижнюю, и рассмотреть их движение отдельно. Однако для человека (в отличие, например, от кошки) такое разделение теряет смысл [6]. При смене позы руки и ноги задействованы одновременно. Показателем эффективности движения является количество мышечной массы. Как уже отмечалось, для мужчин она составляет около 45% от всей массы тела m , для женщин — около 35%, т.е. коэффициент α находится в диапазоне от 0.35 до 0.45.

При этом сила трения равна:

$$F_{\text{тр}} = -\mu v = -\mu x', \quad (7)$$

где μ — коэффициент трения, x' — производная пути по времени, т.е. скорость v . Уравнение силы сокращения мышц будет выглядеть следующим образом:

$$F = -kx, \quad (8)$$

где k — коэффициент сокращения мышц, x — суммарная длина смещения центра тяжести тела при укорочении мышц. При этом уравнение движения примет вид:

$$\alpha m x'' = -\mu x' - kx, \quad (9)$$

где αm — задействованная для поворота мышечная масса. Разделив левую и правую часть на αm и произведя замену переменных:

$$\omega_{0, \text{рук}}^2 = \frac{k}{\alpha m} \quad \text{и} \quad 2\beta_{\text{рук}} = \frac{\mu}{\alpha m}, \quad (10)$$

получим уравнение для движения центра тяжести тела под действием сокращения мышц тела с вязким трением:

$$x'' + 2\beta x' + \omega_0^2 x = 0. \quad (11)$$

Его решение с произвольными начальными условиями известно [26]. Это — экспоненциально затухающие колебания (рис. 8):

$$x(t) = x_1 e^{-\beta t} \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (12)$$

с частотой

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (13)$$

² Для мышечной массы имеется два понятия: первое — просто мышечная масса тела (Lean Body Mass), второе — масса скелетных мышц (Skeletal Muscle Mass). Первое — это искусственное наращивание мышц с целью формирования «красивой» конструкции тела. Так, весьма распространенное явление в XX веке, получившее название Bodybuilding, — вид спорта, включающий интенсивные физические упражнения, направленные на увеличение мышц тела. Второе — необходимая и достаточная для жизни мышечная масса, позволяющая эффективно осуществлять разные типы движения.

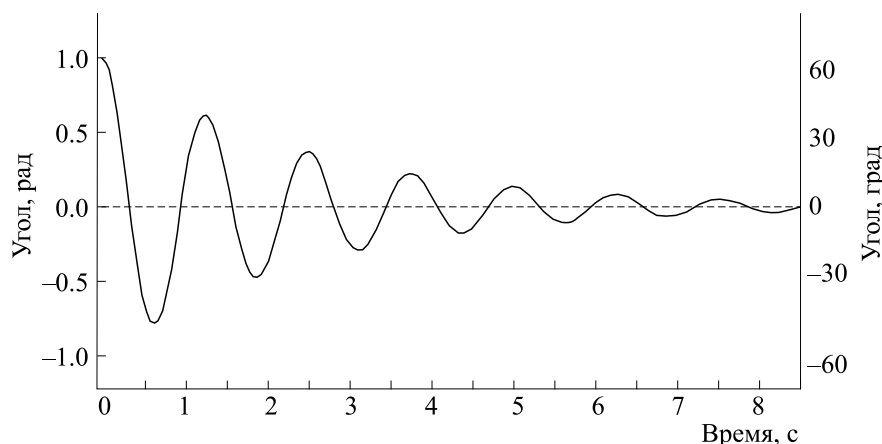


Рис. 8. Колебания тела, возникающие в переходном режиме при изменении позы.

Значения x и φ определяются из начальных условий:

$$x(0) = x_0 \text{ и } dx/dt(0) = \varphi_0. \quad (14)$$

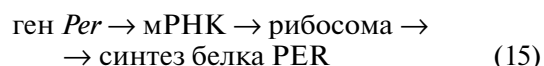
Из выражений (12) и (13) видно что, чем больше коэффициент вязкого трения b , тем быстрее затухают колебания. Кроме того, чем больше β , тем меньше частота ω свободных затухающих колебаний. Лежа на досках, менять позы легче, а спать сложнее из-за сильного давления опоры. Если величина $\beta = \omega_0$, то колебания исчезают. Такое затухание движения будет апериодическим, т.е. без колебаний.

В связи с наличием колебания при смене позы в моторную зону коры мозга по проводящим путям пойдет, хотя и слабый, но продолжительный сигнал длительностью до 8 с, который может превысить порог возбуждения нейронной сети и в быстрой фазе сна вызвать иллюзию полета.

КАКОВА РОЛЬ ЗРЕНИЯ И ОСЯЗАНИЯ В ПОЛЕТАХ ВО СНЕ?

Очевидно, что зрение играет особую роль в распознавании образов [27]. Другая из основных функций зрительной нейронной сети коры мозга в состоянии бодрствования наряду с вестибулярным аппаратом есть ориентационная избирательность наблюдаемых сюжетов (верх — низ, право — лево, ближе — дальше, наклоны) [28]. Большую часть информации из внешней среды наш мозг получает через зрительный канал. Зрение участвует также в обработке информации, получаемой по другим каналам рецепции. Оно распознает источник этой информации. Короче, зрение основной переносчик информации у человека, не случайно в нашем языке есть такое понятие, как *мировоззрение*. (Для собак, например, следовало бы его заменить термином *мирообоняние*.)

Важно также отметить, что зрение связано с циркадными ритмами человека. Еще в последней четверти XX века был обнаружен ген на одном участке X-хромосомы у мушки дрозофилы, который получил название *Period* или сокращенно *Per* [8]. Все отклонения мушек от правильного циркадного поведения были обусловлены различными дефектами этого гена. Это был первый в мире часовой ген, который стал известен биологам. После его клонирования удалось синтезировать белковую молекулу, за производство которой отвечает этот ген. Белок был назван, как и ген, PER (пишется заглавными буквами). Дальнейшие исследования показали, что ген *Per* активен в основном в зрительных клетках дрозофилы, что неудивительно. Он пульсирует в суточном ритме. Пик его активности приходится на вечернее время, на 6 часов раньше, чем синтез белковой молекулы PER. На операцию по цепи:



уходит 6 часов, поэтому максимальная концентрация белка PER регистрируется поздней ночью.

Теперь несколько слов об осязании. Нервные окончания, воспринимающие прикосновения, рассеяны по всей поверхности нашего тела. Осязание — это пример общего (интегрального типа) ощущения. Их показатели позволяют различать лишь динамику прикосновения, т.е. изменение давления во времени. В XXI веке удалось уточнить и составить карту областей мозга, участвующих в хранении тактильных воспоминаний. Было показано, что в обработке и запоминании тактильной информации задействована первичная соматосенсорная кора головного мозга. [29]. Кроме того, ранее удалось выяснить, что хранилище тактильной памяти находится вблизи с хранилищем зрительной памяти [30]

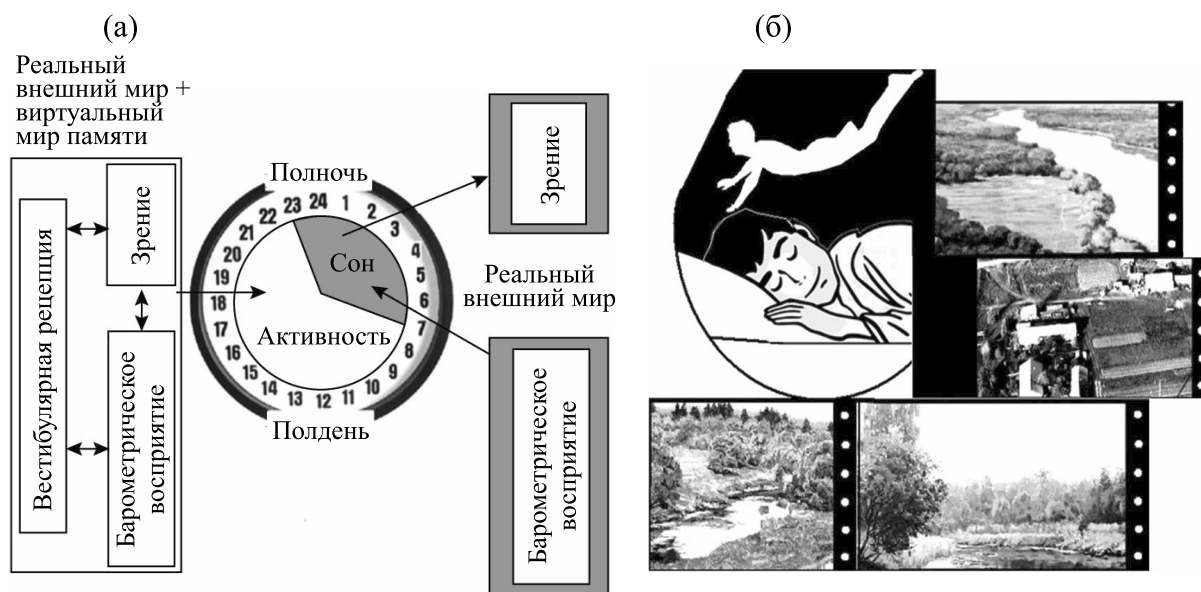


Рис. 9. Взаимодействия зрительной рецепции и барометрического восприятия раздражителя в состоянии дневной активности и в состоянии быстрого сна: (а) — схема взаимодействия, (б) — смена картин в процессе сновидения при виртуальном полете.

Что произойдет, если у человека все рецепторные системы отключить от внешней среды, включая зрение, а оставить лишь одно тактильное восприятие? В этом случае изменение давления от поверхности контакта его тела с постелью и изменение ускорения в гравитационном поле станут неразличимы. Причина простая. В состоянии бодрствования в отличие от состояния сна тактильные рецепторы, взаимодействуют с другими рецепторными системами человека, и, прежде всего, со зрением. В состоянии бодрствования наш мозг связывает всю поступившую информацию от рецепторов с уже существующей информацией в памяти, т.е. с виртуальной моделью внешней среды, и распознает возникшую ситуацию [12]. При этом производится оценка ситуации, а результат оценки через мозжечок и спинной мозг формирует движения тела с целью сохранить жизнеспособность организма. При таком режиме обработки информации неопределенность решения задачи сводится к минимуму [6].

Во сне тактильные рецепторы кожи, т.е. барометрическое восприятие внешнего мира, реагируют на сам факт уменьшения давления, а зрительный канал при закрытых глазах отключен от внешней среды и не связан с каналом осязания. Поэтому в состоянии сна наш мозг не может распознать, за счет чего уменьшилось или увеличилось давление на тело. Следовательно, взаимодействие барометрического восприятия и зрения во сне и наяву различаются (рис. 9а). Поэтому тактильное восприятие приводит при отключении зрительного канала к ошибкам, т.е. уменьшение давления воспринимается как изменение ве-

са тела, иначе говоря, полет. Фигурально выражаясь, во сне: *мозг обмануть совсем не сложно, он сам обманывается рад.*

Иллюзия полета длится недолго, поскольку память при давлении на кожу сохраняется примерно в течение времени до 5–8 с после прекращения раздражения. После этой задержки информация о давлении на кожу становится уязвимой для забывания, т.е. исчезает из хранилища тактильной кратковременной памяти.

Заказчиком картин сновидения становится барометрическое восприятие. Источник картин — это наша ассоциативная память, наши прошлые наблюдения с высоты на окружающий внешний мир. Эти картины наряду иллюзией уменьшения веса воспринимаются двигательными отделами нашего мозга как эффект полета (рис. 9б).

ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из своего опыта, все люди, опрошенные мною, говорят, что иллюзия полетов в сновидениях не столь частое явление, а изменение позы во сне как поиск комфортных условий сна происходит часто. Возникает сомнение, что изменение позы является источником появления иллюзии полетов.

Однако есть причины, которые позволяют объяснить, что эти сомнения ошибочны.

Напомним, что необходимым и достаточным условием полета во сне является возбуждение мозга слабым сигналом, возникающим от поворота тела. Чтобы возбуждение произошло, долж-

ны быть выполнены одновременно два условия. Порог возбуждения мозга должен быть понижен до такого уровня, чтобы амплитуда даже слабого сигнала, исходящего от рецептора, например, рассмотренного выше рецептора барометрического давления, превысила этот порог. Появление сигнала и снижения порога не зависят друг от друга. Покажем, чем ограничено изменение каждого из них.

В-первых, поясним, когда иллюзия полета во сне невозможна. Во время сна мозг занят весьма важным для него самым делом: очисткой своих нейронных сетей от метаболических и информационных «шлаков», накопившихся в состоянии бодрствования. На быструю фазу сна приходится именно информационная очистка. Сюжеты снов — это побочный эффект работы мозга с переработкой плохо упорядоченной информации. Главную роль в этом случае играет важность решения задачи, которая возникла у человека в состоянии бодрствования. В быстрой фазе сна он не только работает с памятью, но и перебирает разные варианты, которые помогли бы решить задачу, и нередко находит решение. Неслучайно говорят, что *утро вечера мудренее* [12].

Когда мозг во сне активно занят работой, то пороги его возбуждения для слабых внешних сигналов достаточно высоки. Следовательно, слабый сигнал от изменения позы не может оторвать его от этой важной для него работы. Это ограничивает частое возникновение полетов во сне.

Во-вторых, поясним, когда иллюзия полета во сне возможна. Низкий порог возбуждения спящему мозгу свойственен, когда он свободен от проблем. Поэтому у счастливых людей, особенно в детском и юношеском возрасте, явление полетов во сне наблюдается чаще.

В-третьих, ответим на вопрос: почему люди сами преуменьшают количество своих полетов во сне? Допустим, что сон длится 9 часов. Из них быстрая фаза сна со сновидениями возникает три раза по одному часу. Хотя сны имеют место в каждой фазе быстрого сна, человек запоминает лишь сюжет последнего сна перед пробуждением. Два других сюжета он не помнит, даже если сюжеты полетов были во всех трех фазах быстрого сна.

В-четвертых, не всякое изменение позы может сформировать сигнал, который может превзойти даже низкий порог возбуждения мозга. Если позу менять очень медленно, то это равносильно высокой вязкости в системе. В таком варианте изменения позы возникновение колебаний вообще невозможно. Этим объясняется то, что в старческом возрасте, при ослаблении мышц рук и ног, поворот в кровати становится проблемой. Следовательно, иллюзия полетов во сне уже невозможна.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что для объяснения полетов во сне нет необходимости прибегать к экзотерическим гипотезам. Иллюзия полетов происходит внутри нашего мозга. Она связана с появлением от рецепторов сигналов, которые превышают порог возбуждения ассоциативной памяти мозга, содержащей сюжеты картин, наблюдаемых с высоты.

2. Иллюзию полетов во сне чаще обнаруживают у себя люди в детском и юношеском возрасте. Однако здоровый человек нередко сохраняет возможность появления таких иллюзий до 50–70-летнего возраста.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-01025-23-01.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Powell, *The Astral Body and other Astral Phenomena* (The Theosophical House, Lond., 1927).
2. S. Freud, *Die Traumdeutung* (Franz Deuticke, Leipzig und Wien, 1900).
3. Альфред Адлер. *Большая советская энциклопедия* (в 30 т.) (под ред. А. М. Прохорова), 3-е изд. (Советская энциклопедия, М., 1969).
4. Юнг Карл Густав. *Большая советская энциклопедия* (в 30 т.) (под ред. А. М. Прохорова). 3-е изд. М.: Советская энциклопедия (1969).
5. V. S. Ramachandran, *The tell-tale Brain. A Neuroscientist's Quest for What Makes Us Human* (W.W. Norton & Company, New York, London, 2011).
6. G. R. Ivanitskii, *Phys. Usp.*, **60**, 705 (2017). DOI: 10.3367/UFNe.2016.08.037871
7. А.Т. Уинфри, *Время по биологическим часам* (Мир, М., 1990).
8. *The 2017 Nobel Prize in Physiology or Medicine* — Press release — NobelPrize.org.
9. Ch. A. Czeisler, J. F. Duffy, Th. L. Shanabian, et al., *Science*, **284** (5423), 2177 (1999).
10. П. Линдсей и Д. Норман, в кн. *Психология памяти*, под ред. Ю. Б. Гиппенрейтер и В. Я. Романова, 3-е изд., перераб. и доп. (АСТ:Астрель, М., 2008).

11. В. М. Ковальзон, *Основы сомнологии: физиология и нейрхимия цикла «бодрствование–сон»* (Бином, М., 2012).
12. G. R. Ivanitskii and A. A. Morozov, *Phys. Usp.*, **63**, 1092 (2020). DOI: 10.3367/UFNe.2020.06.038791
13. Ph. A. Mackowiak, S. S. Wasserman, and M. M. Levine, *J Am. Med. Assoc.*, **268** (12), 1578 (1992). DOI: 10.1001/jama.1992.03490120092034
14. N. Kleitman, *Sleep and Wakefulness* (University of Chicago Press, Chicago, 1936).
15. *Biological Rhythms*, Ed. by J. Aschoff (Plenum Press, New York, London, 1981).
16. Температура тела, в кн. *Популярная медицинская энциклопедия*, под ред. Б. В. Петровского (Советская энциклопедия, М., 1980), с. 601.
17. Ch. Moro, *What position should I sleep in, and is there a 'right' way to sleep?*, <https://modernsciences.org/what-position-should-i-sleep-in-and-is-there-a-right-way-to-sleep>.
18. В. С. Гурфинкель, Я. М. Коц и М. Л. Шук, *Регуляция позы человека* (Наука, М., 1965).
19. J. L. Monteith, In *Heat Loss from Animals and Man*, ed. by J. L. Monteith and L. E. Mount (Butterworths, London, 1974).
20. A. P. Gagge, In *Physiological and Behavioural Temperature Regulation*, ed. by J. D. Hardy, et al. (Thomas, Springfield, 1970).
21. G. R. Ivanitskii, *Phys. Usp.*, **49**, 1263 (2006). DOI: 10.1070/PU2006v049n12ABEH006163
22. D. Bushey, G. Tononi, and C. Cirelli, *Science*, **332**, 1576 (2011). DOI: 10.1126/science.1202839
23. S. Diekelmann and J. Born, *Nature Rev. Neurosci.*, **11** (2), 114 (2010). DOI: 10.1038/nrn2762
24. W. G. Walter, *The living brain* (Pelican Books, Lond., 1963).
25. C. Damiano, D. De Santis, F. Rivosecchi, et al., *BioMed Res. Int.*, 8521893 (2018). DOI: 10.1155/2018/8521893
26. А. А. Андронов, А. А. Витт и С. Э. Хайкин, *Теория колебаний* (Наука, М., 1981).
27. М. М. Бонгард, *Проблема узнавания* (Физматгиз, М., 1967).
28. Д. Хьюбел, *Глаз, мозг, зрение* (Мир, М., 1990).
29. J. A. Harris, C. Miniussi, I. M. Harris, and M. E. Diamond, *J. Neurosci.*, **22** (19) 8720 (2002).
30. G. Sperling, *Psychol. Monogr.*, general and applied, **74**, 1 (1960).

On Illusion of Flying Dreams. The Mechanism of Their Occurrence

G.R. Ivanitskii*

**Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences,
Institutskaya ul. 3, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia*

It is shown that there is no need to resort to exoteric hypotheses to explain flying in a dream. From a biophysical point of view, the phenomenon of "flying in a dream" is based on the already studied adaptive mechanisms and daily rhythms of the human body. During sleep, the brain's arousal thresholds are lowered, making it easier to arouse the brain with weak signals. This study considers one of the mechanisms of such excitation with a change in body position, which is perceived by the brain in the rapid eye movement sleep phase as a decrease in body weight, which, under certain conditions, can cause the illusion of flying in the brain.

Keywords: self-organizing stability of biosystems far from equilibrium, circadian rhythms in the body, alternation of sleep phases with and without dreams, lowering of brain excitation thresholds at night