

А.МИНЕЕВ

**В**ОСПОЛЬЗУЕМСЯ СОВРЕМЕННЫМ жаргоном с целью выяснить, что «круче» на Земле – царство Фауны или царство Флоры, животный или растительный мир – по разным показателям. Для начала – по массе.

В нашем путешествии мы будем заглядывать в две довольно необычные книги. Одна из них – это недавно вышедший превосходный справочник типа «все обо всем» под бесхитростным названием «Новейший справочник необходимых знаний, от альфы до омеги» (М.: РИПОЛ КЛАССИК, 2000). Другая, не менее удивительная книга, – это своеобразная энциклопедия по физике и биологии биосферы, написанная В.Г.Горшковым и называемая «Физические и биологические основы устойчивости жизни» (М.: ВИНТИ, 1995).

## Масса животных и растений

Если говорить о первенстве в общем зачете – в суммарной массе всех животных и растений на Земле, то тут пальма первенства принадлежит растениям. Так, масса всех растений составляет около 2400 млрд тонн, а масса животных и микроорганизмов – около 20 млрд тонн. Отметим, что масса всех людей на этом фоне вообще «не смотрится» – всего порядка 100 млн тонн.

Если перейти к индивидуальному зачету – к сопоставлению масс больших деревьев и больших животных, то тут, казалось бы, также впереди царство Флоры. При оценке максимальной массы деревьев воспользуемся данными статьи «О высо-

ких деревьях» («Квант» №3, 4 за 1991 г.). А именно: максимальная высота деревьев не превышает 150 м, при этом отношение высоты к диаметру дерева  $h/d \sim 50$ . Считая, что дерево имеет форму конуса и его плотность  $\rho \approx 500 \text{ кг/м}^3$ , получим  $M_{\text{max}} \sim \rho \pi d^2 h / 12 \sim 200 \text{ т}$ . К подобной или даже большей оценке приводят данные для самого большого из известных деревьев – мамонтового дерева в Калифорнии, имеющего высоту 83 м и окружность 24 м (т.е. диаметр около 7,6 м): масса такого дерева оказывается более 500 т.

Сопоставим полученную величину с максимальной массой живущих или живших когда-то на Земле животных. Здесь лидируют киты: голубой кит – длина до 33 м, масса до 190 т и кашалот – длина 20 м, масса до 50 т. Достаточно велики индийский слон – высота 3,5 м, масса 6 т, бегемот – длина 4 м, высота 2,5 м, масса 3 т и акулы – китовая длиной 20 м и массой 14 т и гигантская длиной 15 м и массой 9 т. Про крупнейших из ископаемых животных – динозавров – по понятным причинам имеются только данные об их длине и высоте. Так, крупнейшие травоядные – бронтозавры – имели длину 22 м и высоту 5 м; крупнейшие плотоядные наземные животные – тираннозавры – были длиной до 14 м, а крупнейшие плававшие динозавры – плезиозавры – до 16 м (правда, с учетом их огромной шеи). С известной долей условности при оценке указанные данные по динозаврам приводят к массе этих животных до 50–70 т.

Таким образом, казалось бы, масса большого животного уступает мас-

се гигантского дерева. Но картина существенно изменится, если мы сравним массы «живого» вещества представителей царств Флоры и Фауны. Дело в том, что у крупных деревьев большую часть ствола занимает древесина, клетки которой уже потеряли способность участвовать в обмене веществ. Собственно живой частью дерева является тонкий слой вблизи коры дерева, по которому по дереву разносятся вода и минеральные соли (от корней) и продукты фотосинтеза (от листьев). Этот слой имеет толщину порядка десятка годовых колец – не более нескольких сантиметров. В результате живая масса дерева может достигать «всего» несколько тонн (до 10 т). Так что по живой массе представители царства Фауны несколько покруче, чем представители царства Флоры.

## Почему растения неподвижны, а животные обязаны передвигаться, или Законы Горшкова

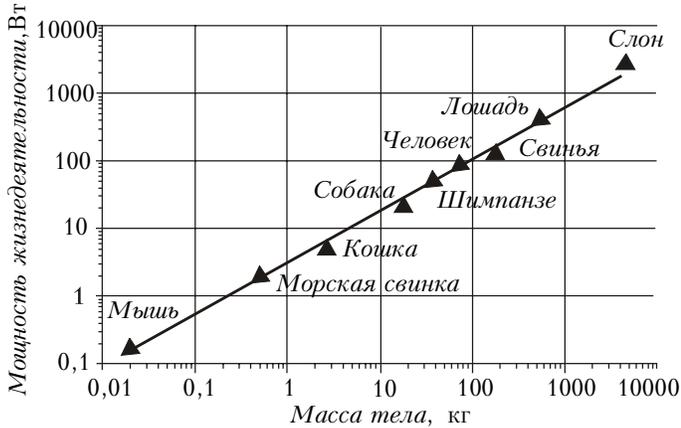
Процесс увеличения массы растений связан с образованием органических веществ в результате фотосинтеза. Солнечный свет является основной движущей силой их роста. От того, передвигались бы растения по поверхности Земли или нет, фактически усваиваемая ими мощность солнечного излучения не зависит и составляет около  $1 \text{ Вт/м}^2$ . Поэтому «стратегия» растений заключается не в передвижении, а в покрытии как можно большей поверхности. Это приводит к предпочтительности привязки растений к определенному участку поверхности Земли и выражается в законе *неподвижности растений*.

Для жизнедеятельности животных требуется гораздо большая мощность потребления энергии. Для оценки ее воспользуемся так называемой кривой «От мыши до слона» из книги К.Шмидта-Нильсена «Размеры животных: почему они так важны?» (М.: Мир, 1987). Из нее видно, например, что для человека массой  $m = 80 \text{ кг}$  величина мощности жизне-



деятельности составляет около 80 Вт (это мощность, которую человек затрачивает в состоянии, близком к покою, а при предельных нагрузках затрачиваемая мощность существенно больше – до 10 кВт, например, при спринтерском беге).

Как можно «использовать» величину мощности жизнедеятельности (или, иначе, мощности метаболизма) человека 80 Вт? Если умножить ее на продолжительность суток (86400 с), то можно получить мини-



Кривая «От мыши до слона»

мальное потребляемое человеком суточное количество энергии – около 7 МДж, или 1800 ккал. Как вы помните, близкую к этому значению энергию человек должен ежедневно получать с пищей. Далее, если поделить 80 Вт на эффективную площадь, занимаемую человеком,  $S \approx L^2$  (где  $L \approx (m/\rho)^{1/3}$  – характерный размер,  $\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность человека), то можно получить удельную мощность, потребляемую человеком: около  $500 \text{ Вт/м}^2$ . Более точные оценки приводят к величине  $1000 \text{ Вт/м}^2$  или даже несколько большей.

Сравнение мощностей, развиваемых растениями ( $1 \text{ Вт/м}^2$ ) и животными ( $1000 \text{ Вт/м}^2$ ), позволяет сделать вывод, что питание животных за счет продуктов жизнедеятельности растений делает необходимым их передвижение в поисках пищи (площадь, которую животное должно обойти в течение дня, на несколько порядков превышает эффективную площадь, занимаемую им самим). Этот вывод называется *законом необходимости передвижения животных*. Следует отметить, что расти-

тельные животные по численности преобладают. Очевидно, что плотоядные животные, питающиеся другими животными, должны двигаться быстрее, чем растительные, по крайней мере в моменты охоты.

### Ограничения на размеры и массу животных

При увеличении размеров животного – для простоты представим его в виде шара радиусом  $R$ , стоящего на ногах длиной  $R$  и радиусом каждой

ноги  $r$ , – его масса растёт пропорционально  $R^3$ , а площадь ног – пропорционально  $r^2$ . Казалось бы, с ростом  $R$  давление на ноги  $p \sim R^3/r^2$  может превысить допустимое, и придется ноги утолщать. А когда толщина станет сравнимой с размером животного ( $r \sim R$ ), размеры живых существ достигнут предела.

Однако измеренное допустимое давление в опорных частях животных довольно велико, так что если бы предел на максимальные размеры животных определялся прочностью, масса животного могла быть более тысячи тонн.

В поисках других ограничений снова обратимся к тому, что живые существа в процессе жизнедеятельности обязаны вырабатывать определенное количество энергии. Приведем выражение для упомянутой выше кривой «От мыши до слона» – зависимости мощности жизнедеятель-

ности  $P$  (Вт) от массы животного  $m$  (кг):

$$P \approx 3m^{0,75}$$

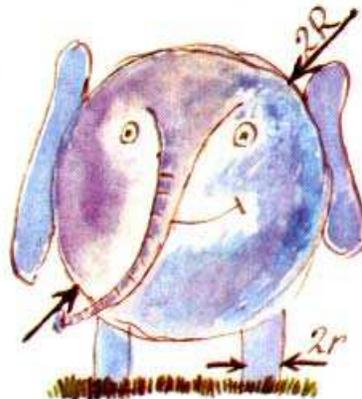
Такую тепловую мощность нужно отводить через поверхность тела площадью  $S$ . Поскольку  $S$  пропорциональна квадрату линейных размеров, т.е.  $m^{2/3}$ , может оказаться, что при большой массе тела отвести тепло будет затруднительно. Проведем соответствующие оценки. Животное массой 100–200 т имеет объем 100–200  $\text{м}^3$  и поверхность тела 100–160  $\text{м}^2$ . Примем, согласно В.Г.Горшкову, что максимально возможная удельная мощность отвода тепла при испарении с поверхности составляет около  $200 \text{ Вт/м}^2$ . Тогда через указанную поверхность тела можно отвести 20–30 кВт тепла. Скорость же производства тепла  $P$  составляет 17–28 кВт. Видно, что животные с большой массой по возможности отвода тепла находятся уже вблизи предела. Тем более что при быстром передвижении они затрачивают еще большую мощность.

Отметим, что как современные, так и, скорее всего, доисторические гиганты животного мира – теплокровные животные. Это означает, что температура их тела выше температуры окружающей среды, и они могут сохранять примерно постоянную температуру в течение длительного времени.

Некоторым аргументом в пользу этого может служить оценка характерного времени  $\tau$  остывания тела животного. Считая, как и раньше, что оно представляет собой шар радиусом  $R$ , получим

$$\tau \sim \frac{CR^2}{\chi}$$

где  $C = \pi^{-2} \approx 0,1$  – коэффициент, связанный со сферической геометрией задачи,  $\chi \approx 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  – температуропроводность воды (напомним, что тела животных из воды в основном и состоят). Отсюда следует, что, например, для человека массой  $m = 80 \text{ кг}$  и эффективным радиусом  $R_{\text{эф}} = (3m/(4\pi\rho))^{1/3} \approx 0,27 \text{ м}$  характерное время остывания составляет  $\tau \sim 5 \cdot 10^4 \text{ с}$  (около 0,6 суток). При радиусе  $R_{\text{эф}} \sim 0,5 \text{ м}$  и, соответственно, массе около 1 т (морж, бизон, носорог)  $\tau \sim 1,8 \cdot 10^5 \text{ с}$  (около 2 суток). Наконец, для крупнейшего из животных массой 200 т (такого,



как голубой кит) и  $R_{эф} \approx 3,6$  м характерное время  $\tau \sim 10^{26}$  с – уже около трети года!

Большие животные медленно меняют температуру тела и должны быть теплокровными. Для упрощения процесса теплоотвода с поверхности такие животные имеют гладкую кожу. В то же время у самых маленьких теплокровных животных, типа мыши массой  $\sim 3$  г, эффективный радиус  $R_{эф} \sim 0,9$  см и характерное время охлаждения  $\tau \sim 1$  мин. В результате такие животные, имея достаточно большую температуру тела (у мыши она  $\approx 38^\circ\text{C}$ ), вынуждены непрерывно искать пищу, съедая ее за день по порядку величины столько же, сколько весят сами. Кроме того, они обязаны иметь шерстяной покров, позволяющий снизить теплоотвод от поверхности тела (коэффициент теплопроводности шерсти приближается к таковому для воздуха и примерно на порядок меньше теплопроводности воды).

Таким образом, у самых маленьких теплокровных животных задача – не замерзнуть, а у самых больших – не перегреться.

### Размеры клеток и скорость роста растений и животных

Размеры типичных клеток животных и растений примерно одинаковы, их характерный диаметр  $d_{кл} \sim 10\text{--}20$  микрон. Однако сходство размеров типичных клеток не исключает наличия специальных клеток, имеющих существенно большую протяженность. Так, довольно велики нервные клетки у животных. А у некоторых растений, в частности у водоросли Нителлы, длина клеток достигает нескольких сантиметров, а диаметр порядка миллиметра. Следует отметить, что нервные клетки

животных, через которые передаются определенные сигналы по их организму, имеют специфическое строение (на техническом языке их можно уподобить волноводной линии). Поэтому их лишь с некоторой натяжкой можно назвать клетками. Нечто подобное происходит и в случае больших клеток Нителлы. Поскольку «управлять» жизнью этих клеток с помощью одного ядра затруднительно, в них имеется множество ядер, каждое из которых обслуживает определенную область большой клетки, – фактически это как бы множество сросшихся клеток.

Рост и развитие растений и животных происходит за счет деления клеток. При этом наибольшая скорость роста, естественно, у молодых организмов. В упомянутом справочнике приводится совершенно поразительный факт: скорость роста бамбука доходит до 75 сантиметров в сутки, т.е. до 3 сантиметров в час! Могут ли животные составить конкуренцию растениям по скорости роста? Тут, по видимому, следует дать отрицательный ответ. Дело в том, что растения могут расти некоторое время только в длину (можно назвать это одномерным ростом). У животных рост всегда двумерный (или трехмерный) – одновременно в длину и в ширину. Поэтому по скорости изменения линейных размеров растения вне конкуренции.

Однако и для растений, и для животных рост – это «просто» деление и дифференциация клеток. Можно ли найти физические причины, ограничивающие скорость роста клеток? Сделаем некоторые оценки. Клетки растений и животных состоят в основном из воды. Коэффициент диффузии для молекул воды при нормальных условиях составляет  $D \sim 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. При размере клеток  $x \sim 10\text{--}20$  мкм характерная скорость диффузионного процесса составляет

$$v_D \sim \frac{D}{x} \sim (0,5 - 1) \cdot 10^{-4} \text{ м/с} = 50 - 100 \text{ мкм/с}.$$

Отметим, что для клеточных размеров скорости как направленного перемещения, так и случайного блуждания оказываются одного порядка.

Сравним указанную величину  $v_D$  с реальной скоростью перемещения веществ внутри клетки. Воспользуемся данными статьи А.В.Приезжева и Ю.М.Романовского «Физичес-

кие основы подвижности клеток» из книги «Школьникам о современной физике» (М.: Просвещение, 1990):

скорость движения ядер и митохондрий в клетке – 50 мкм/с;

скорость движения веществ по системе прокачки клетки – 150 мкм/с.

Очевидно, что скорость образования и роста новых клеток должна быть существенно меньше. Если принять «запас» равным 10, то для скорости роста клеток получаем такую оценку:

$$v_{кл} \sim (0,5 - 1) \cdot 10^{-5} \text{ м/с} = 5 - 10 \text{ мкм/с}.$$

Это составляет 2–4 сантиметра в час или 50–100 сантиметров в сутки. Видно, что наша оценка хорошо совпала с максимальной скоростью роста у растений (75 сантиметров в сутки).

Несколько другие соображения, основанные на скорости производства вещества зеленым растением под действием Солнца (см. статью А.Веденова и О.Иванова «С какой скоростью растет зеленый лист?» в «Кванте» №4 за 1990 г.), также дают оценку, близкую к указанной выше величине скорости роста. Так, при оптимальных условиях (хорошее освещение и питание корней) молодое растение может увеличивать свой рост за день примерно на треть. Это означает, что ежедневная скорость прироста у бамбука может составить 30 см при росте 1 м, 60 см при росте 2 м и 90 см для трехметрового растения. Видно, что это примерно тот же диапазон скорости роста, что и приведенный ранее экспериментальный факт (75 сантиметров за сутки). Нужно отметить, что уже начиная с 2–3 метрового размера ствола бамбука недостаток освещенности и питания корней (в основном из-за конкуренции с окружающими растениями) приводит к замедлению скорости роста. При этом близкий к экспоненциальному закон увеличения массы у молодого побега постепенно сменяется на примерно постоянный прирост массы, характерный для взрослого растения.

На этом прервем краткую экскурсию по миру Фауны и Флоры (по их наиболее «эффектным» представителям), затеянную с целью приоткрыть тайну их «крутизны». Прекрасно, что они есть, царство Фауны и царство Флоры, – это основа и нашей с вами жизни. К тому же, это пища, в том числе... и для ума.

