Принцип энтропии и его приложения к ГРВ-графии

Д.А.Короткин, К.Г. Коротков

Одним из универсальных инструментов для описания системного функционирования биологических объектов и, в частности, организма человека является применение синергетически-вероятностного подхода с использованием обобщенного понятия энтропии. Это понятие широко используется в термодинамике для определения меры рассеяния энергии неравновесной термодинамической системой и в статистической физике в качестве меры вероятности пребывания системы в данном состоянии. В 1949 году энтропия была введена Шенноном в теорию информации как мера неопределенности исхода эксперимента [Shanon, 1988]. Оказалось, что понятие энтропии является одним из фундаментальных свойств любых систем с вероятностным поведением, обеспечивая новые уровни понимания в теории кодирования информации, лингвистике, обработке изображений, статистике, биологии [Yaglom, 1960].

Энтропия непосредственно связана с понятием информации, которое математически характеризует взаимосвязь различных событий и приобретает все большее значение при исследовании функционирования биологических объектов [Stonier, 1990]. Признана необходимость при описании функционирования биологического организма, являющегося открытой диссипативной системой, учитывать процессы обмена как материей и энергией, так и информацией. Влияние внешней информации на организм может быть оценено через изменение энтропии состояния.

В соответствии с концепциями Нобелевского лауреата И.Пригожина в процессе роста и развития организма происходит уменьшение скорости продуцирования энтропии, отнесенной к единице массы объекта. При достижении стационарного состояния суммарное изменение энтропии можно считать равным нулю, что соответствует взаимной компенсации всех процессов, связанных с поступлением, удалением и превращением вещества, энергии и информации. И.Пригожин сформулировал основное свойство стационарного состояния открытых систем: при фиксированных внешних параметрах скорость продукции энтропии, обусловленная протеканием необратимых процессов, постоянна во времени и минимальная по величине $dS/dt \to \min$. Таким образом, согласно теореме Пригожина, стационарное состояние характеризуется минимальным рассеянием энтропии, что для живых систем можно сформулировать следующим образом: поддержание гомеостазиса требует минимального потребления энергии, т.е. организм стремится работать в самом экономном энергетическом режиме. Отклонение от стационарного состояния – заболевание – связано с дополнительными энергетическими затратами по компенсации врожденных или приобретенных биологических дефектов, связано с ростом энтропии.

В динамической системе может быть несколько стационарных состояний, отличающихся уровнем продукции энтропии dS_k/dt. Состояние организма может быть описано в виде набора энергетических уровней (рис.6.2), некоторые из которых устойчивы (уровни *1* и *4*), другие нестабильны (уровни *2, 3, 5)*. При наличии постоянно действующего внешнего или внутреннего возмущения может происходить скачкообразный переход из одного состояния в другое. Любое воспаление характеризуется увеличенным потреблением энергии: температура тела повышается, увеличивается скорость обменных

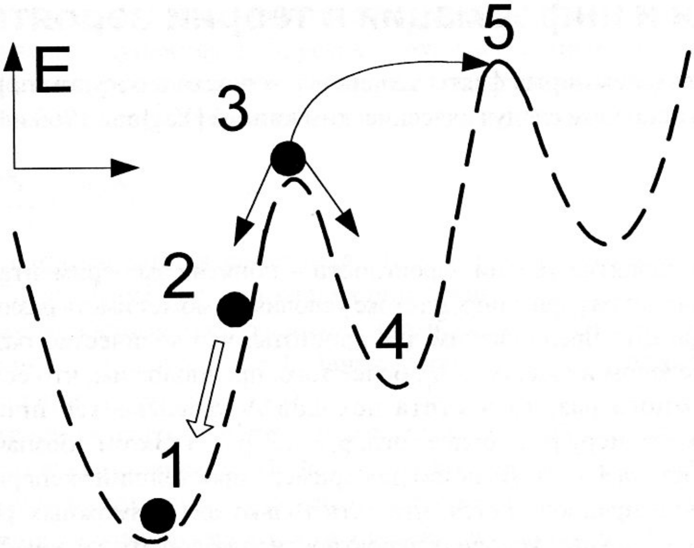

Рис. 6.2. Энергетические состояния биологической системы

процессов. Отклонение от стационарного состояния с минимальными энергозатратами вызывает развитие внутренних процессов, стремящихся вернуть систему обратно, к уровню *1*. При длительных действиях факторов система может перейти на уровень *3*, в так называемую точку бифуркации [Prigogine, 1984], из которой возможно несколько исходов: возвращение на стабильный уровень *1*, переход в другое устойчивое равновесное состояние *4*, характеризующееся новым энергоинформационным уровнем, или “скачок” на более высокий, но нестабильный уровень *5*.

Для организма это соответствует нескольким адаптационным уровням относительного здоровья или хронического заболевания с разными уровнями функционирования системы. Острое заболевание соответствует нестационарному состоянию с повышенной продукцией энтропии, т.е. неэкономному типу функционирования организма. Согласно теории катастроф В.И.Арнольда [1990], при острых заболеваниях или остро развивающихся патологических синдромах (острейшее начало тяжелой пневмонии, астматический статус, анафилактический шок и др.) необходимо скачком перевести организм из “плохого” устойчивого состояния к “хорошему”. При этом целесообразно использовать большие дозы лекарственных препаратов. В фазе затихающего обострения и в ремиссии хронических болезней возрастает роль малых воздействий, например, акупунктуры и гомеопатических средств, оказывающих положительное энергоинформационное воздействие.

Мультистабильность сложных нелинейных систем, какой является организм человека, вероятностная природа его постоянного развития и самоорганизация приводят к необходимости поиска “системообразующих факторов” [Анохин, 1980], к которым может быть отнесена энтропия.

Нами разработан метод вычисления энтропии ГРВ-грамм и создано соответствующее программное обеспечение. Эксперименты показали, что этот параметр является информативной характеристикой состояния организма и может использоваться для оценки состояния и определения направлений терапии больных. Рассмотрим принципы этого подхода более детально.

Энтропия и информация в теории вероятности

Представим некоторые факты теории вероятности и обсудим понятие энтропии и информации, в основном следуя классическим книгам [Yaglom, 1960 и Brilluen, 1959].

Энтропия

Основное понятие теории вероятности – понятие эксперимента, который может быть повторен много раз при одних и тех же условиях и может иметь различные результаты или исходы. Давайте предположим для простоты, что количество различных исходов конечно, и определим их как $A_1 \ldots A_n$, более того, предположим, что если мы повторяем эксперимент много раз, то частота исходов A_i оказывается пропорциональной положительному номеру p_i, и, более того, $p_1 + \ldots + p_n = 1$. Затем обозначим, что исход A_i имеет вероятность $p(A_i) = p_i$. Возьмем для примера простейший эксперимент – бросание монетки. Обычно предполагается, что есть только два возможных результата – орел или решка, при идеальных условиях вероятности этих событий равны S.

Понятие энтропии возникает естественно, если мы зададим следующий вопрос: "Возможно ли дать естественную меру неопределенности исхода эксперимента А?" Например, в эксперименте с монеткой "ловкий игрок" может бросать таким образом, что орел будет иметь вероятность 0,99 и решка только 0,01. Естественно предположить, что мера неопределенности этого второго эксперимента должна быть существенно меньше, чем мера неопределенности эксперимента, который проводится "чистыми руками". Если вероятность орла равна 1, тогда в этом эксперименте совсем нет неопределенности, и мера неопределенности такого эксперимента должна быть минимальной, естественно положить ее равной 0. Интуитивно ясно, что эксперимент со всеми вероятностями $p_i = 1/n$ содержит большую неопределенность, чем эксперимент с каким-то другим значением pj.

Какие другие требования мы хотели бы представить для этой меры неопределенности?

Рассмотрим два независимых эксперимента а и b, обозначим возможные исходы эксперимента b, как $B_1 \ldots B_n$, и их соответствующие вероятности обозначим как $q_1 = p(B_1), \ldots, q_M = p(B_M) \ldots$ Рассмотрим эксперимент ab, исход которого зависит от обеих вероятностей, т.е. представляет собой формальное произведение $A_j\, B_k$ с вероятностями $p_j\, q_k$. Ясно, что неопределенность эксперимента ab должна быть больше, чем степень неопределенности только эксперимента а, так как эксперимент b вводит добавочную неопределенность, естественно предположить, что неопределенность ab должна равняться сумме неопределенностей независимых экспериментов а и b:

$$\mathcal{E}(\alpha\beta) = \mathcal{E}(\alpha) + \mathcal{E}(\beta). \tag{6.1}$$

Чтобы определить универсальное числовое значение e(a), мы должны потребовать, чтобы эта величина не зависела от вида исхода эксперимента A_j, т.е. она должна быть только функцией вероятности p_j: $e(a)=e(p_1,..,p_N)$. Более того, в соответствии с принципом соответствия $e(p_1,..,p_N)$ должна быть инвариантна относительно случайных перестановок номеров p_j. И, наконец, зададим $e(p_1,..,p_N)$ как положительную монотонную функцию вероятности p_j (так как интуитивно понятно, что малые вариации p_j должны приводить к малым же изменениям неопределенности эксперимента).

Оказалось, что мера неопределенности эксперимента, удовлетворяющая всем этим условиям, действительно существует. Опуская некоторые технические условия вывода (см. [Яглом, 1960]), можно показать, что с точностью до положительного произвольного множителя ответ имеет следующий вид:

$$\mathcal{E}(\alpha) = -C\sum_{j=1}^{N} p_j \ln p_j\,, \tag{6.2}$$

где C > 0 – произвольная константа. Значение е(а) называется энтропией эксперимента а. Следует также сделать следующий технический комментарий: события с очень низкими вероятностями дают очень маленький вклад в е. Это не совсем очевидно, так как логарифм In p —> ∞ при p —> 0. Однако легко показать, что произведение *p* In *p* стремится к нулю при стремлении p к 0.

Понятие энтропии в теории вероятности как универсальной меры неопределенности эксперимента было впервые введено Шеноном в 1948 году в рамках теории передачи сигналов. С того времени было показано, что это понятие играет фундаментальную роль в различных приложениях теории вероятности, таких как теория кодирования, лингвистика, обработка сигналов, статистика и т.д. Мы не упоминаем здесь приложение понятия энтропии в биологии, что будет рассмотрено далее. Давайте еще раз отметим основные свойства энтропии:

Энтропия -- это непрерывная, симметричная, не негативная функция вероятностей $p_1,\ldots,p_N$ инвариантная относительно перестановки номеров $p_1,\ldots,p_N$.

Энтропия принимает минимальное значение, равное 0, если и только если одна из вероятностей равна 1, и все другие равны 0, т.е. если эксперимент А не содержат никакой неопределенности.

Для фиксированного N энтропия принимает максимальное значение для эксперимента с равными вероятностями $p_j = 1/N$, тогда

$$\mathcal{E}(\alpha) = C\ln N\,. \tag{6.3}$$

Очевидно, энтропия равновероятного эксперимента непрерывно и монотонно возрастает с увеличением N.

Энтропия произведения двух (и более) независимых экспериментов удовлетворяет закону аддитивности.

Функция энтропии удовлетворяет следующему функциональному уравнению, которое тесно связано с законом аддитивности (6.1):

$$\mathcal{E}(p_1,\ldots,p_N) = \mathcal{E}(p_1+p_2,p_3,\ldots,p_N) + (p_1+p_2)\mathcal{E}\Big(\frac{p_1}{p_1+p_2},\frac{p_2}{p_1+p_2}\Big)\,. \tag{6.4}$$

Информация

Понятие, имеющее очень тесную связь с энтропией – это информация. Оно, естественно, возникает в следующем контексте. Предположим, что у нас есть два эксперимента α и β, которые не независимы, т.е. вероятность исхода A_jB_k (обозначим эту вероятность как $p(A_jB_k)$) не равна произведению вероятностей $p(A_j)$ и $p(B_k)$. Вместо этого мы имеем соотношение

$$p(A_j B_k) = P(A_j) p_{A_j}(B_k)\,, \tag{6.5}$$

где p_{Aj} (B_k)– так называемая условная вероятность исхода B_k, которая равна вероятности B_k при условии реализации исхода A_j. Если эксперимент a и b независимы, реализация выхода A_j никаким путем не может повлиять на эксперимент b и $p_{Aj}(B_k) = p(B_k)$.

Теперь естественно задать вопрос: “Можно ли дать количественную меру неопределенности эксперимента β при условии реализации эксперимента α?” Ответ опять окажется положительным, эта мера неопределенности является условной энтропией, которая может быть записана в следующем виде:

$$\mathcal{E}_\alpha(\beta) = \mathcal{E}(\alpha\beta) - \mathcal{E}(\alpha)\,. \tag{6.6}$$

Это функция вероятности $p(A_j)$ и матрицы условной вероятности p_{Aj} (B_k). Можно показать, что условная энтропия всегда удовлетворяет соотношению

$$0 \le \mathcal{E}_\alpha(\beta) \le \mathcal{E}(\beta), \tag{6.7}$$

поэтому мы можем определить не-негативную величину, которая показывает, насколько неопределенность эксперимента β уменьшается, если мы знаем результаты эксперимента α:

$$I(\alpha,\beta) = \mathcal{E}(\beta) - \mathcal{E}_{\alpha}(\beta)\,. \tag{6.8}$$

Значение I(α,β) называется количеством информации об эксперименте β, содержащемся в эксперименте α. Можно выделить следующие свойства информации (6.8):

• информация симметрична:

$$I(\alpha,\beta) = I(\beta,\alpha), \tag{6.9}$$

т.е. количество информации об эксперименте b, содержащейся в эксперименте a, всегда равно количеству информации об эксперименте a, содержащейся в эксперименте b;

· информация равна нулю, если и только если эксперименты a и b независимы (в соответствии с уравнением (6.1));

· если эксперименты a и b совпадают, информация уменьшается до энтропии эксперимента a:

$$I(\alpha,\alpha) = \mathcal{E}(\alpha), \tag{6.10}$$

поэтому энтропия ε(α) эксперимента α может быть интерпретирована как полное количество информации, которую мы получаем после проведения эксперимента α. Если эксперимент α не содержит никакой неопределенности, т.е. ε(α) = 0, мы не получаем никакой информации после реализации эксперимента в полном соответствии с интуитивным понятием информации.

• Если α, β, γ -- три произвольных эксперимента, имеет место следующее уравнение:

$$I(\beta\gamma,\alpha) \ge I(\beta,\alpha), \tag{6.11}$$

т.е. информация об эксперименте α, содержащаяся в комбинированном эксперименте $\beta\gamma$ всегда больше или равна информации об эксперименте α, содержащаяся только в одном эксперименте β. Отмеченные свойства соответствуют интуитивному пониманию информация для функции $I(\alpha, \beta)$. Добавочная, уже эмпирическая оценка будет дана в одном из следующих разделов.

Случайные величины

Рассмотрим понятие случайной величины, которое будет использовано при анализе БЭО-грамм. Припишем каждому исходу A_j некоторое число $f_j = f(A_j)$. Функция f, определенная на группе исходов, называется случайной величиной, более точно, дискретной случайной величиной. Ясно, что случайная величина f принимает значения $f_1,...,f_N$ с вероятностями $p_1,...,p_N$ соответственно. Теперь мы можем определить среднее значение f_0 случайной величины f:

$$f_0 = \sum_{j=1}^{N} p_j f_j \, , \tag{6.12}$$

дисперсию f:

$$m_1 = \sum_{j=1}^{N} p_j \left| f_j - f_0 \right|^2 \tag{6.13}$$

и высшие центральные моменты

$$m_j = \sum_{j=1}^{N} p_j \left| f_j - f_0 \right|^{j+1}, j = 2,3,... \, . \tag{6.14}$$

Важным обобщением понятия случайной дискретной величины является понятие непрерывной случайной величины, когда номер события A_i становится непрерывным, и случайная величина f может принимать любое значение в интервале $[f_{min}, f_{max}]$ с непрерывной плотностью вероятности $p(f)$. Формулы для среднего значения дисперсии и дискретных моментов для непрерывного случая выглядят следующим образом:

$$f_0 = \int_{f_{min}}^{f_{max}} f p(f) df \tag{6.15}$$

и

$$m_j = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \left| f - f_0 \right|^{j+1} p(f) df \, , j = 1,2,... \tag{6.16}$$

непрерывным аналогом энтропии является следующая величина:

$$\varepsilon = -C \int_{f_{min}}^{f_{max}} p(f) ln\{ p(f) \} df \, . \tag{6.17}$$

Отметим, что в отличие от дискретного случая энтропия, определяемая этой формулой, для некоторых распределений может быть отрицательной, скажем, если $f_{max}-f_{min}<1$ и на всем интервале $p(f) = 1/(f_{max} - f_{min})$.

Как одно из приложений понятия энтропии в этом контексте рассмотрим следующую проблему: среди всех распределений с нулевым средним и фиксированной дисперсией, равной s^2, найти плотность распределения $p(f)$ на интервале $f \in]-\infty, \infty[$ с максимальной энтропией. Ответом является распределение Гаусса:

$$p(f)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}e^{-f^2/2\sigma^2}. \qquad (6.18)$$

Это распределение, по-видимому, наиболее часто встречается в реальной жизни.

Энтропия в физике и стрела времени

Хорошо известно, что на микроуровне все фундаментальные законы физики (классические, квантовая механика, теория поля, общая относительность) инвариантны относительно направления времени. Однако на макроуровне, в нашей реальной жизни, очень сложно представить некоторые процессы, которые идут во времени в противоположном направлении. Скажем, процесс расширения газа в вакууме или растворение куска сахара в чашке чая, естественно, имеют необратимый характер. Одной из немногих теорий, которая выделяет направление стрелы времени как дополнительный микроскопический физический закон, является второй закон термодинамики, использующий понятие термодинамической энтропии.

Термодинамика и статистическая физика изучают макроскопические объекты, т.е. объекты, состоящие их очень большого числа микрообъектов, таких как атомы, молекулы и т.д. Полное описание макроскопических систем посредством фундаментальных законов микрофизики (таких, как квантовая механика или квантовая теория поля) очень сложно, если не невозможно из-за очень большого числа микроскопических степеней свободы. В целом, чтобы сделать какое-то предсказание о макроповедении системы, мы должны знать все микропараметры, поэтому в настоящее время полное описание общих макрообъектов невозможно вообще, если мы не предположим, что макросостояние объекта удовлетворяет некоторым добавочным условиям.

Одно возможное (и очень сильное) предположение заключается в том, что объект находится в состоянии равновесия. Равновесные состояния были объектами исследований классической термодинамики. Оказалось, что вся макроскопически значимая информация о равновесном состоянии микроскопических объектов может быть закодирована всего несколькими параметрами: масса, энергия, плотность, давление, количество частиц, температура и энтропия. Описание объектов в терминах энтропии интуитивно очень ясно. Понятие энтропии было введено в термодинамику значительно раньше, чем в математику. Больцман в 1899 году определил термодинамическую энтропию в равновесном состоянии макрообъектов как:

$$\mathcal{E}^{TD} = k_B \ln N, \qquad (6.19)$$

где k – это очень маленькое число, называемое постоянной Больцмана, а N – обычно очень большое число, равное количеству микроскопических состояний данного макрообъекта. Мы видим формальное совпадение формулы Больцмана (6.19) и энтропии эксперимента с N равными вероятностями (6.3) после выбора произвольной постоянной C, равной постоянной Больцмана k. Эксперимент A может быть сформулирован следующим образом: определить микросостояние нашей макросистемы в предположении, что все N возможных микросостояний имеют равные вероятности. Оказалось, что если полные энергии системы фиксированы, микросостояния макросистемы равновесны. Это равновесие действительно имеет равные вероятности, так называемый "микродинамический ансамбль", поэтому энтропия Больцмана действительно дает ожидаемый эффект такой системы.

Однако определение Больцмана имеет очевидные ограничения. Уравнение Больцмана ничего не говорит о вычислении энтропии для системы, где энергия может флуктуировать (так называемый канонический ансамбль), поэтому различные микросостояния могут иметь разные вероятности. Гиббс обобщил формулу Больцмана на случай канонических ансамблей в виде:

$$\mathcal{E}^{TD} = -k_B \sum_{j=1}^{N} p_j \ln p_j , \tag{6.20}$$

что уже полностью совпадает с формулой энтропии теории вероятности (6.2) после выбора C = k. Более того, если мы перейдем к непрерывным пределам и параметризируем наши микросостояния некоторыми непрерывными параметрами F, формула (6.20) представляет непрерывный предел, ведущий к (6.17) при совпадении C с константой Больцмана. В физике формула (6.20) для обычной термодинамической энтропии называется формулой энтропии Больцмана-Гиббса.

Именно формула термодинамической энтропии используется во втором законе термодинамики и определяет направление стрелы времени в макромире. Существует множество формулировок второго закона, самая простая версия описывает поведение энтропии системы при адиабатическом процессе. Процесс называется адиабатическим, если система не получает или не отдает тепла во время процесса, тогда самая простая формулировка второго закона звучит следующим образом:

В результате адиабатического процесса термодинамическая энтропия системы не уменьшается:

$$(\delta\mathcal{E}^{TD})_{adiabatic} \geq 0 \quad . \tag{6.21}$$

При этом, если система может быть трансформирована из начального в конечное состояние через непрерывную цепь очень близких равновесных состояний, процесс называется обратимым. При обратимом процессе энтропия всегда остается постоянной:

$$(\delta\mathcal{E}^{TD})_{adiabatic,reversible} = 0 \quad . \tag{6.22}$$

Оба адиабатических процесса, рассмотренные в начале этого раздела: расширение газа в большой объем и диссоциация сахара в чашке чая, необратимы, при этом как раз второй закон термодинамики запрещает инверсию этих процессов без внешнего воздействия, поэтому второй закон действительно определяет направление стрелы времени в адиабатических процессах.

Энтропия и информация в биологических системах

Несмотря на огромную сложность биологических систем в целом и человека в особенности, понятие энтропии оказалось очень полезным при описании ряда аспектов поведения таких систем. Рассмотрим следующий психологический эксперимент: имеется N лампочек, и лампа № j вспыхивает с вероятностью p_j. Оператор должен как можно быстрее отметить, какая лампа вспыхнула. Каково среднее время реакции оператора, если эксперимент повторяется много раз?

Ответ оказывается достаточно неожиданным – среднее время реакции пропорционально энтропии эксперимента (6.2), а не количеству ламп, как это кажется интуитивно [Hyman,1953].

Более того, можно повторить эксперимент при других условиях. Мы можем попросить оператора указывать на вспыхивающую лампу как можно быстрее, так что иногда он будет делать ошибки. Затем мы берем два вероятностных эксперимента: эксперимент *a,* результатом которого являются вспышки лампы, и эксперимент *b*, результатом которого являются реакции человека. Оказывается, что среднее время человеческой реакции в этом случае пропорциональна информации *I(ab)*!

Выводы, которые можно сделать из этих экспериментов, заключаются в том, что скорость распространения сигнала по нервным путям человека пропорциональна математически хорошо определимому количеству информации, содержащейся в этом сигнале!

Другой показатель важности понятия энтропии для биологических систем -- это хорошо известный факт, что в любой популяции биологических видов большинство физических характеристик (скажем, вес, длина) имеют гауссово распределение. Как мы знаем, гауссово распределение (6.18) имеет максимальную энтропию, если дисперсия фиксирована. Поэтому мы заключаем, что принцип максимума энтропии (и постоянства дисперсии) имеет приложение к эволюции биологических видов!

Конечно, очень хотелось бы распространить понятие энтропии и информации на уровень биологических объектов, скажем, человечества в целом, рассматривая эволюцию нашей цивилизации как громадный случайный эксперимент. Такие попытки делались многими авторами (см., например, [Stonier, 1990]). Сейчас идет много разговоров об “информационном поле”, как фундаментальном явлении, об информационной значимости биологической жизни и т.п. Не отрицая значимости подобных подходов (мы рассмотрим его более детально в следующей главе), мы должны признать, что в настоящий момент не представляется возможным дать достаточно удовлетворительное теоретическое обоснование этим понятиям.

В то же время, как видно из рассмотренных примеров, понятие энтропия может быть использовано для эффективного описания определенных аспектов жизни индивидуального человека. Наверное, именно поэтому можно экспериментально измерить некоторые характеристики человеческого поведения и затем достаточно удовлетворительно интерпретировать их как “полную энтропию человеческого существования”. В дальнейшем мы введем такое понятие. Затем, основываясь на результатах вычисления этой величины для различных человеческих типов мы покажем, что это понятие действительно может претендовать на экспериментально измеряемую энтропию состояния человека или меру “неопределенности текущего состояния человека”. Для экспериментального обоснования этих идей мы используем анализ ГРВ-грамм. Но предварительно вспомним основные принципы энергетического обмена организма и введем важное понятие **информационного отклика.**

Информационно - энергетический обмен

Для нас привычно, что биологические организмы существуют за счет потребления энергии. Воздух, вода, питательные вещества, микроэлементы – это необходимые компоненты биологической жизни.Интенсивность обмена веществ и энергопродукции организма в условиях умственной и физической активности детально исследована физиологами [Физиология человека, 1996]. Показано, что она зависит от пола, возраста, интенсивности деятельности и в первом приближении может характеризоваться произведенной работой, выделенным теплом и энергией, запасенной в виде депонирования питательных веществ и структурных преобразований.

В то же время не менее важный компонент существования биологических систем – это информационные сигналы. Общепризнанно, что организм осуществляет функциональную саморегуляцию за счет сигналов, поступающих от всех систем и органов, что приводит к непрерывной регуляции их работы за счет вегетативной нервной системы [Анохин, 1980]. Необходимо обратить большее внимание на роль слабых факторов, воздействующих на организм из окружающего пространства и при определенных условиях вызывающих информационные реакции.

Для простых организмов это в основном сигналы, связанные с поведенческой активностью: поиском пищи, партнеров, тревогой или удовольствием. Для более сложных организмов, в частности человека, эти сигналы определяют многие особенности жизни и поведения как на сознательном, так и на подсознательном уровне.

Общая и специальная сенсорная физиология изучает общие принципы, лежащие в основе сенсорных способностей, т.е. работы отдельных **сенсорных систем** и их результата – субъективного **восприятия** человеком. Она принимает во внимание факторы окружающей среды, улавливаемые сенсорными органами. Такие факторы называются сенсорными стимулами. Под их влиянием рецепторные клетки генерируют потенциалы, которые активируют афферентные нервные волокна. Импульсация многих афферентов проводится к сенсорным центрам в мозгу, где производится обработка информации.

Сенсорный стимул может приводить к возникновению субъективного **ощущения**. Например, электромагнитные колебания с длиной волны 400 нм вызывают ощущение «голубого цвета». Человек говорит: «Я вижу голубое небо». Интерпретируя ощущения на основании предшествующего опыта и текущего настроения, человек приходит к **восприятиям**. Восприятие голубого неба различно для жителя северных широт и обитателя знойного юга.

Закон «специфичности сенсорных энергий», сформулированный 150 лет назад Иоганнесом Мюллером, гласит, что характер ощущения определяется не стимулом, а раздражаемым сенсорным органом. Это один из важнейших законов субъективной сенсорной физиологии. Сенсорные органы принято подразделять на три основные группы [Физиология Человека, 1996]:

1. Органы и рецепторы, стимулируемые окружающей средой. Все они относятся к **экстероцепторам**.

2. Другие органы определяют длину мышц, натяжение сухожилий, углы в суставах и другие параметры положения и движений тела. Их называют **проприоцепторами**. К этой группе можно также отнести вестибулярный аппарат.

3. Наконец, сенсорная информация поступает и от внутренних органов тела. Идущие от них эфференты носят название **интероцепторов**.

Одним из основных понятий психофизики является понятие **сенсорного порога**. Он определяется как наименьший по интенсивности стимул, способный вызвать определенное ощущение. Иногда под ним понимают наиболее низкий порог, достижимый при оптимальных условиях стимуляции и адаптации. Например, пороговые значения для слуха зависят от частоты звука, для зрения – от времени адаптации. В надпороговом диапазоне определяют еще один вид порога – «едва заметное различие». Это величина, на которую один порог должен отличаться от другого, чтобы их разница воспринималась человеком. Э.Вебер в 1834 г. показал, что минимальное различимое изменение интенсивности стимуляции dj составляет постоянную долю от ее исходной интенсивности j. Это закон Вебера, выражаемый уравнением

$$\delta\varphi \;/\; \varphi = Const \quad .$$

Данное правило выполняется в широком диапазоне для многих сенсорных модальностей, являясь полезной мерой относительной чувствительности сенсорных систем. Нельзя математически сравнить чувствительность глаза к силе света с чувствительностью уха к уровню звукового давления, но можно сопоставить между собой безразмерные коэффициенты Вебера для этих модальностей. Исследование зависимости интенсивности ощущений от величины стимула является важной задачей психофизики. Многолетние экспериментальные исследования позволили выявить определенные закономерности, среди которых наиболее известны психофизический закон Фихнера и закон Стивенса [Stevens, 1975].

В последние десятилетия продемонстрирована высокая эффективность методов лечения, основанных на воздействиях на организм слабыми, подпороговыми факторами. К ним можно отнести различные электромагнитные сигналы слабой интенсивности; световое, в том числе лазерное, излучение; аэроионы в малых дозах; не говоря уже о гомеопатии и фитотерапии. Клинически продемонстрированная эффективность подобных методов воздействия позволяет перейти к рассмотрению относительно нового для психофизиологии класса взаимодействий, которые можно обозначить как информационные.

Информационно-значимыми сигналами мы будем называть воздействия на организм, которые характеризуются интенсивностью стимула, меньшей абсолютного порога ощущений, но при этом инициируют развитие цепочки психофизиологических процессов (реакций) самого организма.

В обычных физиологических представлениях подпороговые сигналы считаются незначимыми для функционирования, и они никогда не были предметом исследования психофизики. Очевидно, что к ним неприложимы известные законы о связи реакции организма с интенсивностью стимула. Поэтому в подобных случаях представляется целесообразным говорить о развитии информационных реакций.

Эти специфические информационные реакции *R* развиваются по следующим законам [Пономаренко, 1999]:

1. $\mathbf{W_R >> W_F}$: Энергия реакции многократно превышает энергию действующего фактора. Эффекты развиваются за счет свободной энергии организма, т.е. той части внутренней энергии, которая используется для биологического окисления и транспорта метаболитов.

2. $\mathbf{R = f(L)}$: Направленность реакции определяется областью воздействия L: в зависимости от области приложения стимула организм реагирует по-разному; экспериментальные факты свидетельствуют, в частности, о важности понятий рефлексогенных зон и биологически активных точек.

Рис. 6.3. Принципиальная схема энергоинформационного обмена в организме

3. $\mathbf{R = f(\nu)}$: Реакция зависит от частоты действующего фактора.

4. $\mathbf{R \neq f(t)}$: Реакция не зависит от времени воздействия, т.е. она начинает развиваться с момента воздействия и продолжает развиваться, когда действие уже закончилось.

Таким образом, можно говорить о том, что внешние сигналы оказываются инициаторами специфических реакций, протекающих за счет свободной энергии самого организма. На этом принципе основана современная вибрационная, волновая, физическая или информационная медицина, медицина низкой интенсивности. Используемые в этих методах факторы влияют на организм не за счет вносимой ими в организм энергии или химических веществ, а за счет регулирующего влияния на электронно-ионные процессы. Поэтому все чаще говорят о развитии **квантовой медицины**, хотя очевидно, что подобные утверждения требуют тщательной концептуальной проработки и экспериментального обоснования .

Можно говорить о нескольких путях обработки и анализа информационных сигналов (рис 6.3). Часть сигналов непосредственно влияют на физиологические процессы путем тонкой регулировки квантовых биоэлектрических и химических процессов организма. В современной химии общепризнанно, что действие катализаторов основано на включении дополнительных электронно-ионных связей и процессов. Очевидно, что катализаторами могут выступать не только физические вещества, но и физические агенты: фатоны, электроны и поля. Все эти факторы приводят к активизации и запуску внутренних процессов организма, которые стремятся перевести его в наиболее энергетически выгодное состояние в соответствии с принципами рис. 6.2. Организм всегда предпочитает наиболее энергетически выгодное состояние при данном уровне адаптационных возможностей.

У человека к саморегулирующим процессам добавляются эфекты влияния психики, и на высшем уровне – комплексное воздействие душевной организации (см. рис. 6.3). Все эти процессы прямо или опосредованно сказываются на физиологическом уровне, при правильной направленности обеспечивая оптимальный уровень функционирования. Априори невозможно определить, какое из слабых информационных воздействий окажется резонансным, вызовет максимальный каталитический эффект, адекватный информационный отклик.Поэтому с практической точки зрения наиболее выгодно использование широкого спектра воздействующих факторов, из которых организм выбирает наиболее оптимальные в авторегуляционном режиме.

Практика последних десятилетий XX века показала высокую эффективность лечебного воздействия слабых подпороговых факторов, но значение информации в жизни человека и животных не ограничивается только влиянием на его состояние. Информационные сигналы играют определяющую роль в процессе развития организма, превращении его из зародыша в активно функционирующего представителя данного вида. Особенно важно это для развития человека.

Несколько лет назад в горах Греции охотники обнаружили стадо горных козлов, среди которых они увидели маленькое человекообразное существо. Устроив облаву, охотники смогли поймать это существо, при этом уничтожив все остальное стадо. Это оказался мальчик 10-12 лет, который вел себя как козленок. Он ходил только на четырех ногах, ел траву и когда его привезли в город, забился под кровать и никоим образом оттуда не вылезал. Единственной пищей, которую он согласился есть помимо травы, оказалась пицца. Все попытки вернуть его в человеческое общество потерпели неудачу.

И через несколько лет он скончался от тоски по своим родным горам. И таких "маугли", воспитанных разными животными, известно немало. Во всех случаях они оставались животными, так и не превратившись в людей.

Подобные факты говорят о том, что в процессе развития человека, да и любого живого существа, определяющую роль играют информационные сигналы, которые младенец получает с момента рождения. Многолетние статистические исследования показывают, что на ранних этапах развития тип поведения в основном определяется влиянием среды, с годами все более сильно проявляется влияние генов [Plomin, 1997]. Таким образом, можно с полным основанием утверждать, что для развития и существования человека определяющую роль играет потребление не только энергии, но и информации, т.е. сигналов, идущих из окружающей среды и вызывающих специфические информационные реакции за счет внутренней энергии самого организма. Следовательно, можно говорить о возникновении нового научного направления -- информационной биологии и информационной медицины.

Информационный отклик биологического объекта

Рассмотрим простой эксперимент: по улицам вечернего города мчится пожарная машина, издавая громкие сигналы. Она проезжает мимо дома, все жильцы которого слышат сигнал. Они реагируют по-разному: большинство не обращает внимание и даже не замечают этого сигнала; мальчик 9 лет начинает мечтать, как он станет пожарником и прославится; автомобилист начинает беспокоиться, хорошо ли он поставил машину и не будет ли она повреждена мчащимися пожарниками; молодая жена пожарника переходит в состояние стресса и не находит себе места, пока муж не позвонит по телефону и не успокоит ее. Мы видим разнообразные реакции на один и тот же звуковой раздражитель, так как этот сигнал имеет для них разное значение.

Вопрос: что нас интересует в оценке данной ситуации?

Ответ: нас интересует оценка отклика различных людей на воздействующий сигнал.

Вопрос: можем ли мы оценить количество информации, содержащейся в самом сигнале?

Ответ: мы можем посчитать количество информации в сигнале пожарной машины, например, закодировав сигнал в двоичной системе.

Вопрос: играет ли это какую-то роль для оценки реакции?

Ответ: это не играет никакой роли для оценки информационной реакции отмеченных выше людей.

Вопрос: чем же определяется эта реакция?

Ответ: она определяется всем предыдущим опытом данного человека, его состоянием в данный момент времени (спящий человек может прореагировать на сигнал, но только на подсознательном уровне), состоянием как физическим, так и ментально-психологическим; а также моделью поведения и уровнем претензий, принятым данным человеком.

Вопрос: возможно ли аккуратно учесть все эти факторы?

Ответ: невозможно, потому что количество вовлекаемых в рассмотрение факторов не является счетным.

Рассмотрим концептуальный подход к описанию информационных процессов в биологических объектах, развитый с учетом поставленных вопросов.

Информационный канал

В соответствии с теорией информации Шеннона можно ввести понятие информационного канала для биологических объектов, включающего следующие основные компоненты [Физиология Человека, 1996]:

Источник информации → Передатчик → Канал передачи → Приемник → Пользователь (Адресат).

Например, в случае сенсорной системы эта цепочка будет выглядеть следующим образом:

Сенсорный стимул → Потенциалы действия рецепторов → Нервные волокна → Синапсы нейронов в ЦНС → Центральная нервная система в целом.

В этом случае информация кодируется последовательностью нервных импульсов по методу, аналогичному частотной модуляции. Универсальным носителем информации выступает частота нейронной импульсации.

В нейрофизиологии характеристики информации включают, например, качество, интенсивность, частоту, местоположение, протяженность и длительность стимула, действующего на сенсорный орган. Они передаются по нервному волокну в виде последовательности потенциалов действия (нервных импульсов).

Рассмотрим канал передачи информации, в котором пользователем выступает сознание человека. Проанализируем отдельные свойства информационного канала.

Информационные сигналы

Ежесекундно организм человека получает большое количество внешних сигналов. Они переносятся материальными носителями, имеющими различную физическую природу. Приведем несколько примеров:

- оптическое излучение переносится фотонами разной энергии;
- звук распространяется молекулами воздуха;
- запах переносится молекулами определенного вещества;
- механические воздействия, раздражая поверхность кожи, вызывают тактильные ощущения;
- электромагнитные сигналы переносятся электромагнитным полем.

Это перечисление можно продолжить, но и так очевидно, что носителем информационных сигналов могут быть любые феномены окружающего мира, однако только часть из получаемых сигналов являются значимыми для организма.

Мы назовем информационно-значимыми сигналами те из получаемых организмом сигналов, которые являются триггерами внутренних психофизиологических процессов самого организма. Таким образом, значимость информационного сигнала может быть оценена по реакции организма на этот сигнал. Из миллионов раздражителей организм отбирает небольшую часть и реагирует на эти сигналы каскадом внутренних процессов, происходящих за счет запасенной организмом свободной энергии. Таким образом, энергетическим источником информационного отклика являются внутренние ресурсы организма.

Можно провести определенную (весьма условную) классификацию информационных сигналов:

- внешние и внутренние стимулы, воспринимаемые организмом из окружающего пространства и генерируемые внутренними системами и органами, в частности, мыслями; и обрабатываемые на сознательном и бессознательном уровнях;

- энергоинформационные и чисто информационные сигналы, отличающиеся по интенсивности и характеру эффектов, вызываемых в биологическом объекте: как отмечено выше, стимулы разной интенсивности вызывают эффекты качественно разного характера;

- резонансные и нерезонансные для данного организма сигналы.

Эту классификацию можно продолжить и расширить, однако важно отметить, что с точки зрения развиваемой концепции характер воздействующего сигнала не является принципиальным: нам важно оценить реакцию объекта независимо от типа и характера воздействующего сигнала. Понятие информационного отклика позволяет провести эту оценку количественно.

Как было показано выше (формула (6.8)), количество информации определяется через изменение энтропии состояния объекта. Введем понятие кванта информации, которое при условии постоянства энтропии источника обозначим как

$$dI = \gamma d\varepsilon \quad , \tag{6.23}$$

где de – единичное измерение энтропии состояния приемника.

Основные свойства, вытекающие из формулы (6.23):

1)Квант информации отличен от нуля при наличии изменения состояния приемника под влиянием принятого сигнала.

2)Квант информации не зависит от характера сигнала, переносящего информацию, или от природы носителя информации.

Возьмем интеграл от обеих частей уравнения (6.23) на промежутке времени от t_1 до t_2:

$$\int_{t_1}^{t_2} dI = I_R \int_{t_1}^{t_2} dt = \gamma \int_{t_1}^{t_2} d\varepsilon \; ; \tag{6.24}$$

$$\Rightarrow I_R(t_2 - t_1) = \gamma \int_{t_1}^{t_2} d\varepsilon \quad ; \tag{6.25}$$

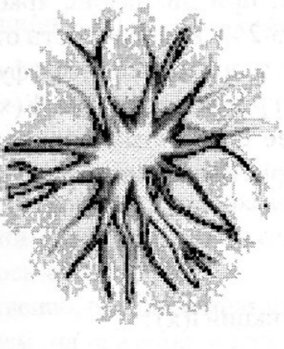

Рис. 6.4. ГРВ-грамма капли жидкости в диапазоне 0-255

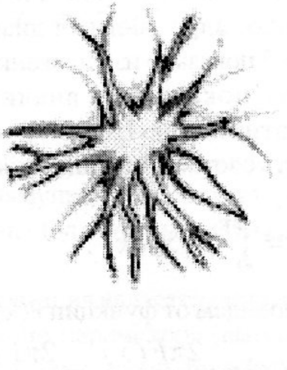

Рис. 6.5. Та же ГРВ-грамма при обработке 200

$$I_R = \frac{\gamma}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} d\varepsilon \quad . \tag{6.26}$$

Величину I_R обозначим как параметр информационного отклика. Эта величина оценивает, какие изменения произошли в данном объекте за определенный промежуток времени под влиянием информационного сигнала. Параметр γ назовем коэффициентом информационной зависимости.

Выражение (6.26) переносит акцент в рассмотрении информационных сигналов от источника и носителя к реакции объекта, воспринимающего информацию и дает практический способ к ее вычислению. В методе ГРВ эти вычисления доведены до практического уровня и воплощены в программах. Это позволяет по экспериментальным данным оценивать информационное содержание того или иного эксперимента, например, канала передачи информации от одного человека к другому.

Использование вероятностных параметров для описания ГРВ-грамм. ГРВ энтропия

ГРВ-грамма пальца или капли жидкости представляет собой фигуру с радиальным распределением плотности (рис.6.4), которая характеризуется некоторой диаграммой распределения плотности. Это изображение может быть представлено как функция F(x) некоторого аргумента x от угла в пределах 0-2p. В качестве функции F(x) может выступать максимальная длина радиуса изображения, длина медианы, яркость или средние величины по радиусу. Для реальной ГРВ-граммы эта функция во многом определяется характером обработки исходного изображения, в то же время физические принципы формирования изображения позволяют стандартизировать эти процедуры. Как показал анализ многочисленных экспериментальных данных, можно выделить центральное ядро ГРВ-граммы и диффузное свечение вокруг него. Центральное ядро связано с засветкой от каналов электронно-ионных лавин, диффузное свечение обусловлено рассеяной фотонной эмиссией объекта. Убрав эту эмиссию с изображения, мы сохраним только центральное квазистабильное ядро, что облегчает последующую обработку изображений. Суммарную площадь удаленного изображения сохраним в виде отдельного коэффициента BEa. Как показали эксперименты, при диапазоне яркостей 0-255 центральное ядро занимает диапазон примерно 0-225-240, в зависимости от источника. На рис. 6.5 показано изображение в диапазоне 0-225, т. е. при удалении диффузного шума.

Как показывает анализ множества ГРВ-грамм, функция F(x) является квазихаотической. Поэтому мы можем считать ее случайным распределением и вычислить соответствующие статистические параметры. Введем интегральную функцию

$$Q = \int_0^{2\pi} F(x)dx \quad . \tag{6.27}$$

Перейдем от функции F(x) к нормированной функции f(x) :

$$f(x) = \frac{2\pi F(x)}{\int F(x)dx} = \frac{2\pi F(x)}{Q}, x \equiv [0,2\pi] \quad . \tag{6.28}$$

Очевидно, что данная функция удовлетворяет условию нормировки:

$$\int f(x)dx = 1, x \equiv [0,2\pi]. \quad (6.29)$$

Функция f(x) в пределах от 0 до 2π меняется от f_{min} до f_{max}. Разделим область значений функции f(x) на N равновеликих интервалов и построим график G(f) распределения плотности значений функции f(x) в интервале $[f_{min}, f_{max}]$. Для использования статистически-вероятностных методов N должно быть порядка 1000. С целью использования вероятностной интерпретации введем нормированную функцию g(f), имеющую смысл плотности вероятности:

$$g(f) = \frac{G(f)}{\int G(f)df}, f \equiv [f\,max, f\,min]; \quad (6.30)$$

$$\int g(f)df = 1, f \equiv [f\,max, f\,min]. \quad (6.31)$$

С использованием этой функции можно применить стандартный язык теории вероятности для описания функции f(x): вычислить математическое ожидание f_0 и посчитать дисперсию m_1 и высшие центрированные моменты:

$$m_1 = \int |f - f_0|^2 g(f)df, f \equiv [f\,max, f\,min]; \quad (6.32)$$

$$m_k = \int |f - f_0|^{k+1} g(f)df, f \equiv [f\,max, f\,min]. \quad (6.33)$$

По аналогии с широко используемым понятием термодинамической энтропии введем термин энтропии ГРВ-граммы, которое определим следующим образом:

$$\varepsilon = -\int g(f) log\{g(f)\}df, f \equiv [f\,max, f\,min]. \quad (6.34)$$

Важной характеристикой поведения функции является степень повторяемости свойств функции *f(x)* на определенном расстоянии. В частности, наличие повторяемых элементов ГРВ-грамм вдоль окружности. Этот параметр задается видом автокорреляционной функции (мы рассматриваем круговую фигуру *f{x* + 2П) = *f(x)):*

$$K(y) = \int_0^{2\pi} (f(x) - f_0)(f(x+y) - f_0)dx. \quad (6.35)$$

Если *K(y)* близко к 0, корреляция на расстоянии *y* отсутствует; если функция автокорреляции имеет четко выраженный пик, корреляция существует. Характеристикой этой функции является угол автокорреляции, т.е. угол, под которым функция K(y) пересекает ось абсцисс.

Естественно, предложенная статистическая интерпретация является определенным приближением: на практике могут наблюдаться корреляции параметров (амплитуды) в различных точках. (По-видимому, могут существовать близкие и дальние корреляции). Однако для нас значение ГРВ энтропии прежде всего практическое: оно позволит ввести классификацию ГРВ-грамм по степени “разбаланса”. А именно: для сильно разбалансированных ГРВ-грамм (соответствующих нестабильному состоянию гомеокинеза) функция F(x) случайна, что приводит к высокому значению энтропии. В то время как ровные, “спокойные” ГРВ-граммы, соответствующие низкому уровню неопределенности функции F(x), имеют меньшее значение энтропии.

Развитые принципы были воплощены в серии программ и проверены на практике. Проверка показала высокую значимость понятия энтропии для описания ГРВ-грамм. Более того, полученные результаты дают все основания предполагать, что введенная по формальным признакам функция напрямую связана с рассмотренным выше понятием энтропии биологического объекта. Например, ГРВ энтропия меняется с возрастом в полном соответствии с ожидаемым поведением. Этот вопрос, а также примеры практического использования ГРВ энтропии, рассматриваются в третьей части книги.