

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ХИМИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

§ 16.1. Введение

В предыдущей главе мы ознакомились с автоколебательными и автоволновыми процессами, характерными для открытых систем, находящихся вдали от равновесия. Единственный экспериментальный факт, который мы пока привлекли, состоял в периодическом изменении популяций зайцев и рысей, соответствовавшем модели Вольтерра (с. 498). Однако таких биологических фактов множество. На всех уровнях организации, от макромолекулярного до популяционного, в биологических системах происходят незатухающие колебания характеристических физических параметров — ферментативной активности, концентрации метаболитов, параметров, определяющих физиологическое поведение, численности популяций и т. д.

Можно привести аргументы в пользу того, что биологическая система не только может, но и должна быть колебательной. Первый аргумент следует из всего изложенного в предыдущей главе. Сложная открытая система, включающая автокаталитические химические реакции, вдали от равновесия зачастую выходит на предельные циклы. Следовательно, автоколебания в такой системе весьма вероятны. Вторым аргументом приведен Молчановым. Биологические системы являются результатом длительной эволюции. Устойчивые системы за время эволюции должны были уравновеситься, стать частью среды. Напротив, неустойчивые системы за это время распались. Следовательно, лишь системы, внутренние движения в которых имеют колебательную природу, могли сохраниться.

Эволюция — добиологическая и биологическая — происходила на Земле, вращающейся вокруг Солнца и вокруг собственной оси. Это не могло не отразиться на самом ходе эволюции (см. § 17.5). В то же время эволюция в условиях периодической смены температуры, освещенности и увлажнения должна была запечатлеться в физиологии как животных, так и растительных организмов. Это третий аргумент. Суточная периодичность действительно свойственна жизненным процессам. В связи с этим было введено понятие *биологических часов*. Биологические колебания с периодом, близким к суточному, такие, например, как смена сна и бодрствования, называются *циркадными ритмами*. Циркадные ритмы повсеместны в живой природе, они имеют эндогенный,

врожденный характер. Физическая причина циркадных ритмов несомненно лежит в автоколебательных процессах — их периоды практически независимы от температуры и других внешних факторов. Циркадные ритмы автономны как на организменном, так и на клеточном уровне.

Четвертый, не менее существенный аргумент состоит в том, что сколько-нибудь сложная машина может работать непрерывно лишь путем периодического преобразования энергии в работу. Периодичность свойственна любым движущимся устройствам — одним из величайших изобретений *Homo sapiens* было колесо (см., впрочем, с. 413). Очевидно, что сложная живая система, обладающая автономным существованием, эволюционно достигает уровня периодически работающей машины — мы имеем в виду системы дыхания и кровообращения. Движения животного — бег гепарда, прыжки кенгуру, полет птицы, плавание рыбы, скольжение змеи, движение ресничек инфузории — представляют собой периодические, зачастую *автоволновые процессы* превращения химической энергии в механическую работу (гл. 12). Теоретическое и экспериментальное исследование химических и биологических периодических явлений имеет поэтому весьма важное значение для биофизики, биохимии, физиологии, для биологии в целом.

§ 16.2. Реакции Белоусова — Жаботинского

Начнем рассмотрение периодических процессов с химических автоколебательных явлений.

В 1959 г. Белоусов в краткой заметке сообщил об открытии им периодических изменений цвета раствора с частотой порядка 10^{-2} Гц в ходе окисления лимонной кислоты броматом, причем катализатором были ионы церия. Изменение окраски определялось периодическими превращениями $\text{Ce}^{3+} \rightleftharpoons \text{Ce}^{4+}$. Белоусов наблюдал десятки периодов. В дальнейшем детальные экспериментальные и теоретические исследования этих и родственных им явлений были проведены Жаботинским с сотрудниками (1964—1974).

Реакции Белоусова — Жаботинского — окислительно-восстановительные реакции. Рассмотрим в качестве примера реакцию, в которой окислителем является бромат (ион BrO_3^-), восстановителем — малоновая кислота (МК , $\text{H}_2\text{C}(\text{COOH})_2$), а катализатором — ионы церия. Колебания окраски, определяемые изменениями концентрации Ce^{4+} , являются релаксационными (рис. 16.1, а). Их период τ делится на две фазы, τ_1 и τ_2 — нарастания и падения $[\text{Ce}^{4+}]$. Упрощенная схема реакции содержит две соответствующих стадии:

