

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БИОЛОГИИ

ENERGY ASPECTS OF BIOLOGY

V. Karpin
O. Shuvalova

Summary. The most important manifestation of the vital activity of organisms is the constancy of the internal environment (homeostasis). It is provided primarily by the dynamic equilibrium of the metabolic processes of assimilation — dissimilation, which K. Bernard designated as a physiological axiom embracing all life phenomena. The most important problem of theoretical biology is the identification of intimate mechanisms for maintaining homeostasis in an unstable environment, including the mechanisms of self-organization of the observed dynamic equilibrium. The article attempts to represent homeostatic processes based on the thermodynamics of biological systems. This approach reveals not only the intimate mechanisms of the extraordinary stability of living organisms, but also the elements of its self-regulation.

Keywords: theoretical biology, homeostasis, energy aspects.

Карпин Владимир Александрович

Доктор медицинских наук, Сургутский
государственный университет
kafter57@mail.ru

Шувалова Ольга Ивановна

Кандидат медицинских наук, Сургутский
государственный университет
shuvalova78@mail.ru

Аннотация. Важнейшим проявлением жизнедеятельности организмов является постоянство внутренней среды (гомеостаз). Оно обеспечивается прежде всего динамическим равновесием метаболических процессов ассимиляции — диссимиляции, которое еще К. Бернар обозначил как физиологическую аксиому, обнимающую все жизненные явления. Важнейшей проблемой теоретической биологии является выявление интимных механизмов поддержания гомеостаза в нестабильной окружающей среде, в том числе механизмы самоорганизации наблюдаемого динамического равновесия. В статье предпринята попытка представления гомеостатических процессов на основе термодинамики биологических систем. Данный подход раскрывает не только интимные механизмы необычайной устойчивости живых организмов, но и элементы ее саморегуляции.

Ключевые слова: теоретическая биология, гомеостаз, энергетические аспекты.

Несмотря на то, что живой организм является очень сложной органической структурой, он отличается необычайной стабильностью: вся его деятельность протекает на определенном практически неизменном уровне. «Установлено, что живая клетка, изолированная или составляющая часть сложного многоклеточного организма, представляет подвижную, саморегулирующуюся систему. Она не находится в абсолютном равновесии со своим окружением. Ее внутренняя организация поддерживается активными процессами, направленными на ограничение, предупреждение или устранение сдвигов, вызванных различными воздействиями из внешней и внутренней среды. Способность возвращаться к исходному состоянию после отклонения от некоторой средней величины, вызванного тем или иным физическим, химическим, физиологическим фактором — особое преимущество живой клетки. В известной мере это относится и ко всему организму, который состоит из огромного числа строго дифференцированных клеток. В процессе своей жизнедеятельности он поддерживает и восстанавливает их структуру и функции на молекулярном, микро- и ма-

кроскопическом уровнях вопреки всем нарушающим извне и изнутри влияниям» [5, с. 12].

Впервые вопрос о постоянстве внутренней среды организма поставил французский ученый К. Бернар около 150 лет назад. Он разделил все явления жизни на две большие группы: органическое разрушение и органическое созидание, показав, что это разделение характеризует общую физиологию и обнимает в своей общности все жизненные явления: «Все, что ни происходит в живом существе, относится к одному или к другому из этих типов; и жизнь характеризуется соединением и сцеплением этих двух порядков явлений. Это деление жизни кажется нам наилучшим из всех, какие могут быть предложены в общей физиологии. Оно самое обширное и вместе с тем наиболее согласное с действительной природой вещей. ... Мы не можем себе представить ни одного живого существа... без участия в нем этих двух порядков явлений. Это физиологическое основание, на котором движутся все разнообразные формы в обоих царствах» [2, с. 108]. <...> «Иначе и нельзя себе представить существа, одаренно-

го жизнью. И действительно, эти явления совершаются одновременно во всяком живом существе в неразрывном сцеплении. Дезорганизация, или дезассимиляция изнашивает живую материю в органах, находящихся в *функционирующем* состоянии; ассимилирующий синтез возрождает ткани; он собирает материалы для запасов, которые функционирование должно израсходовать. Эти две операции разрушения и обновления, обратные одна относительно другой, связаны безусловно и нераздельно в том по крайней мере смысле, что разрушение есть необходимое условие обновления. Явления функционального разрушения сами суть предшественники и виновники материального обновления посредством того образовательного процесса, который бесшумно совершается внутри тканей. Потери вознаграждаются по мере того, как они происходят, и равновесие восстанавливается тотчас же, как только оно обнаруживает склонность к разрушению, и потому тело постоянно сохраняется неизменным в своем составе. ... Это физиологическая аксиома...» [2, с. 109].

Неослабевающий научный интерес поиска глубинных механизмов динамического равновесия всех жизненных процессов продолжается до настоящего времени.

Чтобы понять структурно-функциональные первоосновы организации живых организмов, необходимо применить современные стратегические методологические подходы. Данная попытка основана на применении системного подхода и термодинамики неравновесных процессов.

Системный анализ внес существенный вклад в обсуждаемую проблему: все современные исследования стали рассматривать биологические объекты любого иерархического уровня как комплексы взаимосвязанных элементов с последующими поисками системообразующих факторов. Но какие механизмы удерживают живые организмы в состоянии постоянства внутренней среды? Биохимические исследования пролили свет на химические составляющие динамического равновесия, но остается не совсем понятной самоорганизация этих процессов.

Ученых различной специализации издавна интересовала взаимосвязь материи и энергии в организации окружающего материального мира, вплоть до появления в конце XIX века среди некоторых ученых идеалистической философской концепции энергетизма, сводящей все явления природы к видоизменениям энергии, лишенной материальной основы (В. Оствальд, Э. Мах и др.). В противоположность абсолютизации энергетизма А. Эйнштейн отстаивал закон взаимосвязи массы и энергии: «Из теории относительности мы зна-

ем, что вещество представляет собой огромные запасы энергии, и что энергия представляет вещество. ... Различие между массой и энергией не качественное... Вещество — там, где концентрация энергии велика...» [10, с. 209–210].

Появление новой науки термодинамики ознаменовало собой следующий крупный шаг в познании Природы. Принципы термодинамики универсальны для живой и неживой природы. Термодинамика обязательно использует понятие системы. Любая система как комплекс взаимосвязанных элементов может быть названа термодинамической системой.

Живой организм можно представить как открытую биологическую систему, непрерывно обменивающуюся с окружающей средой веществом, энергией и информацией. Традиционно научные исследования здесь преимущественно направлены на изучение различных процессов обмена веществ. В то же время не меньший интерес должны представлять различные превращения энергии при постоянном прохождении через все биологические объекты и их влияние на организацию и поддержание жизненных процессов.

Все физико-химические процессы в живом организме осуществляются за счет внутренней энергии. В свою очередь внутренняя энергия состоит из свободной и связанной энергии. Энергетическое обеспечение всех процессов в биосистеме осуществляет свободная внутренняя энергия. Связанная энергия — это теплота, энтропия, это безвозвратно потерянная энергия, поэтому КПД любой работы всегда будет ниже 100%.

Внутренняя свободная энергия осуществляет все процессы, идущие с затратой энергии, всю внутреннюю и внешнюю работу. Внешняя работа — это добыча, поглощение, переваривание и всасывание пищи, а также физическая (механическая) работа. По сути, вся внешняя работа есть физическая работа. Внутренняя работа — это химическая работа, это процессы ассимиляции и диссимиляции. Внутренняя работа — это пластическая (структурная) работа.

Нужно четко представлять себе, что именно и только структура организма является источником внутренней свободной энергии. Процессы ассимиляции (синтез) являются запасом, накоплением и источником свободной энергии. Процессы диссимиляции (распад, разрушение) являются процессом высвобождения и затраты внутренней свободной энергии.

Универсальным источником внутренней энергии организма является АТФ. Он участвует во всех внутренних энергетических процессах, сам периодически то

распадаясь (отдавая энергию), то вновь синтезируясь, опять с затратой внутренней свободной энергии. Эти процессы необратимы и требуют постоянного притока внешней свободной энергии (солнечная энергия или питание).

Следует подчеркнуть, что химическая энергия пищи (внешняя энергия) не идет напрямую, непосредственно на удовлетворение энергетических нужд организма. Она должна сначала перейти в структурную энергию, и уже оттуда «черпать силы». Восстановление структурной энергии также требует затрат внутренней свободной энергии, которая в свою очередь требует притока внешней свободной энергии. (Такой сложный физико-химический «клубок»).

Жизнь иногда называют «отрицательной энтропией», потому что организмы способны поддерживать сложную структуру, несмотря на влияние своего окружения. Но, так же как и любые другие системы, состоящие из вещества и энергии, они подчиняются второму закону термодинамики и вынуждены постоянно работать, создавая и поддерживая упорядоченные ансамбли вещества и энергии. Этот процесс требует энергии, и организмы получают ее от Солнца, чтобы противостоять второму закону в своих собственных тканях, создавая порядок из беспорядка. Где бы мы ни находили проявления жизни, мы всегда найдем здесь же источник энергии. Ни один организм не может долго просуществовать без непрерывного притока энергии [7].

Причем при всем при этом биологическая система должна находиться в стационарном состоянии (термодинамическом неравновесном состоянии), то есть все противоположно направленные процессы должны быть уравновешены. При стационарном состоянии производство и выделение энтропии должны быть эквивалентными, т.е. поступление негэнтропии (отрицательной энтропии) из внешней среды должно восполнять потерю положительной энтропии.

Одной из важнейших характеристик биосистем является устойчивость стационарных состояний: при отклонении системы от стационарного уровня в ней возникают силы, стремящиеся вернуть ее в первоначальное положение. Этот феномен был описан еще 150 лет назад как принцип Ле-Шателье, но он был научно обоснован только в XX веке с появлением новой науки термодинамики.

Изучение проблем законов термодинамики стало новым шагом в биологических науках, на которые впервые обратил внимание Э. Бауэр (1935 г.) [1]. Он установил, что живые организмы всегда находятся в состоянии термодинамического неравновесия, что

противоречило популярной в то время теории термодинамического равновесия («принцип устойчивого неравновесия» Э. Бауэра). В дальнейшем подобные исследования в области теории неравновесной термодинамики были продолжены бельгийским ученым И.Р. Пригожиным [4].

И. Пригожин выдвинул теорию термодинамической устойчивости в системах, далеких от термодинамического равновесия, к которым относятся все сложные биологические системы, предложив теорему о минимуме производства энтропии: стационарные состояния соответствуют минимуму производства энтропии. Если на систему подействовать возмущением, то производство энтропии увеличится, но система ответит на это возвращением в состояние с наименьшим производством энтропии. Организм стремится работать на самом выгодном энергетическом режиме. При определенном возмущающем воздействии система может или погибнуть, или перейти в новое стационарное состояние. Таким образом, достижения термодинамики раскрыли как механизмы стационарного состояния биосистем, так и их эволюцию, а также показали существование в природе процессов самоорганизации [8].

Динамическое равновесие в биологических системах поддерживается энергетической регуляцией биохимических процессов. Классическим примером является дыхательный контроль.

Сопряжение окисления с фосфорилированием в митохондриях отличается прочностью: если невозможен синтез АТФ, то прекращается и окисление. В эксперименте *in vitro*, если в инкубационной смеси имеются все исходные вещества, за исключением АДФ, то поглощения O_2 (дыхания) не наблюдается. После внесения АДФ сразу же начинается и дыхание, и синтез АТФ. По мере расходования АДФ скорость дыхания снижается и совсем прекращается, когда вся АДФ превратится в АТФ.

Этот механизм регуляции имеет очень важное значение, так как в результате его действия скорость синтеза АТФ определяется потребностью клетки в энергии: при увеличении расходования АТФ в клеточных процессах увеличивается концентрация АДФ, а это автоматически ведет к ускорению дыхания и фосфорилирования. Темп работы митохондрия задается фактическими затратами АТФ [6], [9].

В результате анализа обсуждаемых процессов Б.С. Доброборским в 2006 г. был сформулирован «Второй закон термодинамики биологических систем», объясняющий, каким образом живые организмы поддерживают свое неравновесное термодинамическое состояние: «Устойчивость неравновесного термодина-

мического состояния биологических систем обеспечивается непрерывным чередованием биохимических процессов потребления и выделения энергии посредством управляемых реакций синтеза и расщепления АТФ соответственно [3, с. 29]. Таким образом, комплекс биохимических реакций живого организма, направлен-

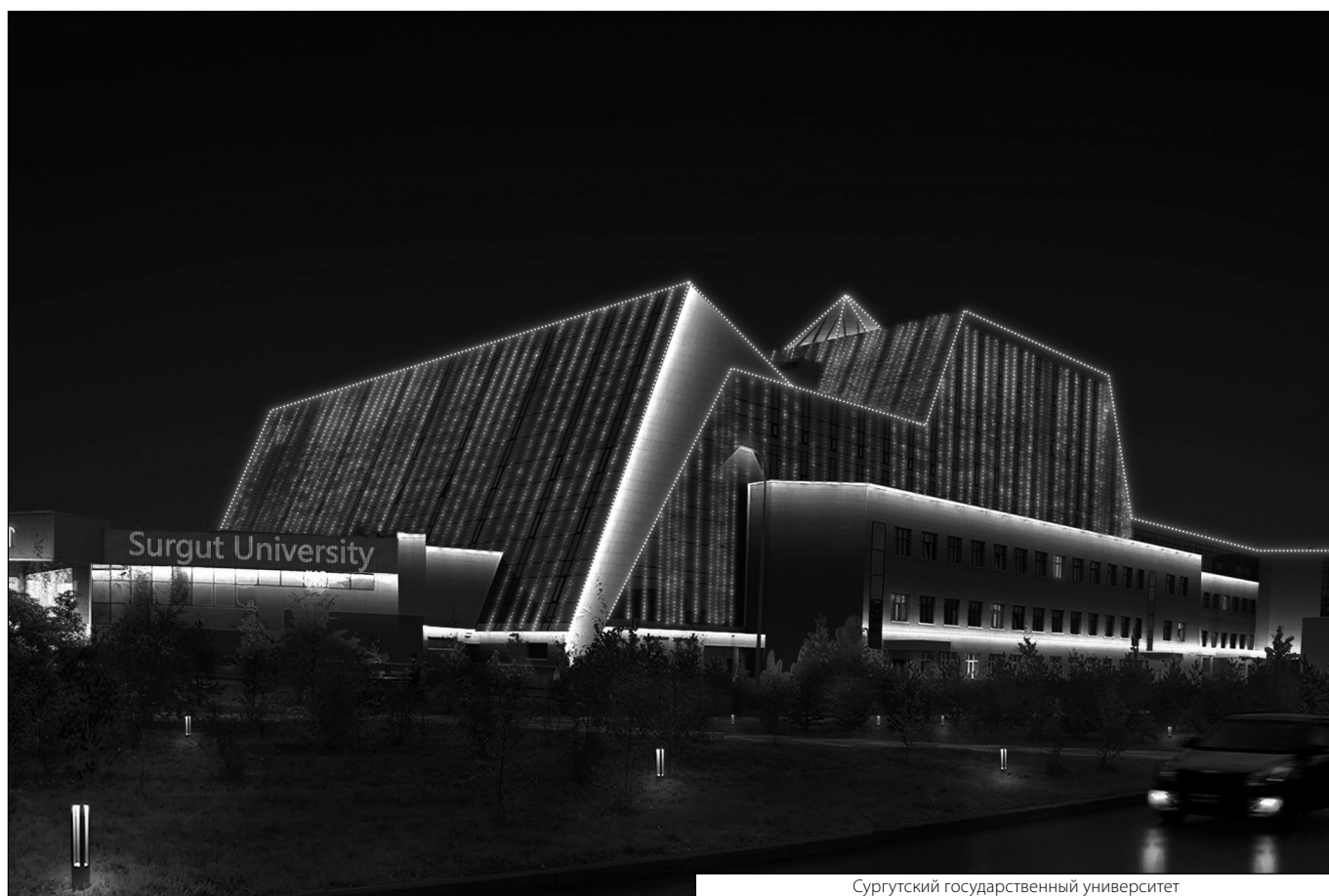
ный на обеспечение его неравновесного термодинамического состояния путем непрерывного чередования синтеза и расщепления АТФ проявляется макроскопически тем фундаментальным процессом жизнедеятельности, который в биологии носит название постоянства внутренней среды организма, или гомеостаза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бауэр Э. Теоретическая биология / Э. Бауэр. — СПб.: Росток, 2002. — 352 с.
2. Бернар К. Курс общей физиологии / Пер. с франц. / К. Бернар. — СПб., 1878. — 354 с.
3. Доброборский Б.С. О гомеостазе с позиции термодинамики биологических систем / Б.С. Доброборский. // Инновационная наука. — 2020. — № 6. — С. 28–30.
4. Доброборский Б.С. Термодинамика биологических систем / Б.С. Доброборский. — СПб, 2012. — 47 с.
5. Кассиль Г.Н. Внутренняя среда организма / Г.Н. Кассиль. — М.: Наука, 1983. — 133 с.
6. Николаев А.Я. Обмен веществ и энергии // А.Я. Николаев. Биологическая химия. — М.: МИА, 2001. — С. 160–350.
7. Ондар С.О. Принципы термодинамики в биологических системах / С.О. Ондар. // Вестник Тувинского государственного университета. — 2011. — № 2. — С. 35–46.
8. Пригожин И. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках / Пер. с англ. / И. Пригожин. — М.: КомКнига, 2006. — 296 с.
9. Самойлов В.О. Биоэнергетика // В.О. Самойлов. Медицинская биофизика. — СПб.: СпецЛит, 2013. — С. 203–239.
10. Эйнштейн А. Эволюция физики / А. Эйнштейн. — М.: ООО «Тайдекс Ко», 2005. — 264 с.

© Карпин Владимир Александрович (kafter57@mail.ru), Шувалова Ольга Ивановна (shuvalova78@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Сургутский государственный университет