

ЧЕТВЕРТЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ: НЕОФОРМЛЕННАЯ ВЕРШИНА.

С.Т.Захидов

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
Институт биологии развития им. Н.К.Кольцова, Российская академия наук

В будущем будет открыт всеобъемлющий биологический закон, который по его важности можно будет поставить рядом с обоими законами термодинамики, тогда можно будет создать "биологическую" философию подобно тому, как теперь создать философию энергетическую. На ось созданного всеобъемлющего биологического закона можно будет нанизать все богатство и разнообразие содержания науки о жизни.

В.Оствальд

Мы должны ожидать, что в живом веществе преобладает новый тип физического закона.

Э.Шредингер

ПРЕАМБУЛА

Классическая феноменологическая термодинамика, основанная Р.Клаузиусом в 1854 году, базируется на постулатах. До настоящего времени она включала в себя три основных начала или принципа.

Первое начало термодинамики - закон сохранения энергии, общая формулировка которого сводится к тому, что энергия всегда сохраняется; она не может возникнуть из ничего и не может исчезнуть в никуда; при всех физических и химических процессах данное значение энергии остается неизменным. Этот закон устанавливает, в частности, что изменение внутренней энергии dU в системе равно сумме подведенной к системе тепла dQ и произведенной над данной системой

работой $dW: dU = dQ + dW$. Теплота и работа рассматриваются, как величины, находящиеся между собой в такой зависимости, что постоянно в одной форме является то, что исчезает в другой (Р.Майер, Д.Джоуль). Как известно, механической работой можно вызвать различные физические изменения; при восстановлении прежних состояний опять получается механическая работа, точно в таком же количестве, какое было необходимо, чтобы вызвать восстановленные потом изменения. В этом заключается принцип сохранения энергии. Для обозначения того, не уничтожающегося нечто, мерой которого служит механическая работа, мало помалу вошло в употребление название энергия, введенное впервые Т.Юнгом. Энергия усматривается во всякой перемене физического состояния, уничтожение которого создает работу (или эквивалентную ей теплоту). Принцип сохранения энергии сводит к невозможности существования *perpetum mobile*, т.е. непрерывного произведения работы без постоянного, сохраняющегося изменения (Э.Мах). Закон сохранения энергии, как заметил Э.Мах, считается во всем культурном мире совершенно неоспоримой истиной и что во всех областях естествознания этот закон находит самое плодотворное применение.

Принцип под названием второго начала термодинамики был введен Клаузиусом. Суть его заключается в том, что теплота не может перейти без компенсации от более холодного тела к более горячему; в природе существуют необратимые процессы, т.е. все изменения, происходящие в ней, имеют одностороннее направление. Мерой такой необратимости любого процесса служит количество механической работы, остающегося неиспользованным, хотя при обратимых процессах потерянную работу следует считать равной нулю. В 1865 году Р.Клаузиусом была выведена

формула: $\int \frac{dQ}{T} = 0$. Величина, с помощью которой оценивают направления изменения в природе и которая остается неизменной при обратимых процессах и возрастает при необратимых процессах, стремясь к максимальному значению, автор второго начала термодинамики назвал энтропией. Под энтропией (S), являющейся неотъемлемой частью II начала термодинамики, понимают количество теплоты, которое не может быть уже превращено в механическую работу, т.е. некоторое количество энергии, остающегося недоступным для дальнейшего использования. Однако, как считал Дж.Блэк, исчезнувшее бесполезно количество теплоты можно рассматривать как еще существующее, но скрытое. Она – теплота – также скрыта в парах, как кислород в воде.

Поскольку энтропия горячего тела (S_1) с температурой T_1 уменьшается при переходе тепла от него к холодному телу с температурой T_2 , а энтропия последнего (S_2) увеличивается, сумма обоих изменений, т.е. изменение общей энтропии в системе тел, равна $-\frac{Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2} > 0$. Любые химические и физические процессы, служащие примером необратимости, однонаправленного течения, происходят так, что увеличивают сумму энтропий всех тел, участвующих в этих процессах.

Вскоре после того как У.Томсон и Р.Клаузиус выдвинули идею о тепловой смерти всего пространства Вселенной, превращение ее в вечное кладбище в результате перехода всей полезной механической энергии в теплоту, т.е. в деградированную энергию, исчезновения всех сил взаимодействия, которые еще в состоянии произвести работу, необратимый рост энтропии стали связывать с направлением течения времени.

Согласно Р.Клаузиусу, энергия Вселенной постоянна (если она и теряется, то теряется не количественно, а качественно), энтропия же стремится к максимуму. И производство энтропии определяет направление течения процесса. Между тем Мах позволил себе заметить, что «выражение «энергия мира» и «энтропия мира» носят на себе следы схоластики, поскольку, какой же может иметь смысл применять эти понятия к случаю, к которому они вовсе не применимы, в котором значение их не поддается определению. Если бы действительно существовала возможность определить энтропию мира, эта энтропия представляла бы настоящую абсолютную меру времени. Отсюда лучше всего видно, что это только тавтология, когда говорят: «энтропия мира возрастает вместе со временем». В том то и дело, что то, что известные изменения происходят только в одном определенном направлении и факт времени есть одно и то же».

Выдающийся австрийский физик-теоретик Людвиг Больцман, веривший в существование молекул и их способность выделять тепло во время движения, считал, что между огромными совокупностями молекул, движущихся хаотически, т.е. с различными скоростями и в различных направлениях и тепловыми процессами существует тесная связь и что теплота не может быть полностью превращена в механическую работу (хотя обратное возможно) в силу одного весьма важного обстоятельства, а именно – тенденции природы к необратимому увеличению беспорядка. На основе атомистической гипотезы и кинетической теории газов Больцман вложил в «стремление» энтропии новый смысл и придал II началу термодинамики статистический характер. Понятие энтропии было полностью сведено к понятию вероятности (*H*-теорема), и обе величины связались между собой

простым законом: $S = k \cdot \ln W$. Другими словами энтропия прямо пропорциональна натуральному логарифму термодинамической вероятности; численное значение последней лежит между 1 и 0. По мнению Больцмана, энтропия возрастает только в среднем, и достигает максимального значения в состоянии термодинамического равновесия; лишь в редких случаях есть крошечная вероятность, что энтропия, благодаря самопроизвольным флуктуациям, может локально уменьшаться.

Словом, «...природа предпочитает более вероятные состояния менее вероятным и осуществляет только переходы, направленные в сторону большей вероятности. Материя состоит из атомов, теплота есть движение молекул и теплопроводность, равно, как и все остальные необратимые процессы (трение, диффузия, излучение света и тепла, распад атомов радиоактивных веществ), управляется не динамическими, а статистическими законами, т.е. законами вероятности. Теплота потому переходит от тела с более высокой t к телу с более низкой t , что состояние равномерного распределения t более вероятно, чем всякое такое состояние, при котором t распределено неравномерно. Сущность II начала термодинамики можно выразить больцмановской «гипотезой элементарного беспорядка» – допущением, что отдельные элементы, которыми оперирует статистический метод, совершенно независимы друг от друга. Энтропия, таким образом, *это не только тепло, поделенное на температуру*, но и мера величины вероятности, а возрастание энтропии сводится просто к тому, что за менее вероятными состояниями следуют состояния более вероятные. Фундаментальную константу Больцмана ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.) сам Больцман не употреблял (в теоретическую физику ее ввел Планк после смерти

Больцмана) и считал неосуществимым такое измерение этой постоянной. Более вероятному состоянию соответствует более позднее время. События нашего мира необратимы, их развитие идут в одну сторону весьма вероятно, а в другую – хотя и возможно, но случается один раз в миллион лет» (Планк, 1925). Главным результатом научной деятельности Больцмана – писал далее Планк – является то, что он освободил понятие энтропии от экспериментального искусства человека и вместе с тем возвысил второе начало термодинамики до степени реального принципа, состоящего в том, что понятие энтропии полностью приводится к понятию вероятности.

Второе начало термодинамики имеет несколько формулировок, но в главном – это фундаментальный закон монотонного возрастания энтропии. Первый закон всех наук (Эйнштейн), высший метафизический закон Вселенной (Эддингтон).

И все-таки, что такое энтропия? Что это за загадочное явление, не имеющее, как говорится, наглядного образа. Что это за дефиниция, имеющая разный смысл и разное выражение в науке. Итак, в двух словах. Энтропия – это часть внутренней энергии системы, которая необратимо рассеялась (диссипировала), деградировала в тепловой форме, обесценилась, потеряла качество, потеряла потенциал, необходимый для возвращения системы в начальное состояние; энтропия – это связанная энергия ($T \cdot S$), энергия, которая не может быть использована для совершения работы при неизменной температуре, это равномерное распределение энергии, антиэнергия. Энтропия – это молекулярная неупорядоченность, хаос огромного множества движущихся микрочастиц, термодинамическая функция, которая описывает стремление системы к равновесному, успокоенному

состоянию; энтропия – средство, с помощью которого измеряется количество беспорядка в системе, степень разрушения начальной организованной структуры. Энтропия – это размешанность (Гиббс), неопределенность (Шеннон), стрелка, отмеряющая время (Эддингтон), управляющий параметр развития системы, «показатель эволюции», фактор, запускающий процесс самоорганизации (Пригожин).

Третий принцип (начало) термодинамики был сформулирован Вальтером Нернстом в 1906 году. Согласно этому принципу, при температуре стремящейся к абсолютному нулю (-273°C) изменение энтропии (dS) всякой системы стремится к 0, а самое значение энтропии – к некоторому постоянному пределу – S_0 и именно при 0K от системы невозможно получить какое бы то ни было тепло, нет никаких открытых энергетических проявлений, физических активностей, созидания; и именно при 0K деградация системы невозможна, хотя в действительности, она всегда налицо. По мере понижения температуры и ее приближения к абсолютному нулю – который в принципе недостижим – молекулы и атомы начинают переходить постепенно от теплового хаотического движения к равновесному, упорядоченному, они теряют энтропию, останавливаются, достигая, в конечном счете, предельного случая, а именно, состояния покоя. Позже тепловая теорема Нернста была дополнена гипотезой-идеей Планка о том, что условие $S_0 = 0$ при $T = 0\text{K}$ является следствием квантового характера процессов, происходящих в любой системе при низких температурах и выполняется только для систем, находящихся при $T = 0\text{K}$ в состоянии устойчивого, а не метастабильного равновесия. Постулат Планка позволяет определять энтропию через термодинамическую вероятность (W) состояния системы: $S = k \cdot \ln W$. При 0K система находится в квантовом

состоянии с наименьшей возможной энергией (нулевой энергией), поэтому вероятность нахождения в этом состоянии $W_0 = 1$. Соответственно, энтропия системы в состоянии с наименьшей энергией E_0 равна: $S = k \cdot \ln W_0 = k \cdot \ln 1 = 0$. Следовательно, постоянную S_0 можно брать за условное начало нулевого отсчета энтропии. Стационарное, нулевое состояние системы, в которой энергия не меняется со временем, – это $dS = 0$. На самом деле стационарное состояние это далеко не покой; стационарному состоянию нередко соответствует минимальное производство энтропии.

«ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОЧТЕНИЕ» ГЕНЕТИКИ ИЛИ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ МИР – СИСТЕМА С НУЛЕВЫМ УРОВНЕМ ЭНТРОПИИ

Термодинамика генома – самостоятельный закон термодинамики
И.А.Рапопорт

Прошло более сорока лет с тех пор, как вышла в свет замечательная книга крупного советского ученого, самого сильного представителя кольцовской школы, биолога-эволюциониста и генетика, основоположника химического мутагенеза, Героя Социалистического труда, лауреата Ленинской премии, члена-корреспондента АН СССР Иосифа Абрамовича Рапопорта “Микрогенетика”. Микрогенетика – это понимание особенностей генетических процессов, таких как аутокатализ (репликация ДНК), гетеросинтез (транскрипция), мутагенез, репарогенез – процессов, протекающих на микроуровне. Микрогенетика – это понимание, дающее ключ для получения глубоких знаний о структуре и функции наследственного вещества, в том числе и с позиции

классической термодинамики. В «Микрогенетике» впервые показано термодинамическое своеобразие микрогенетического аппарата, господство в нем порядка, исключающего возможность таких преобразований, которые свойственны химическим веществам, для которых, как известно, высокая упорядоченность возможна только при t абсолютного нуля.

Ниже в конспективной форме, практически не видоизменяя авторского написания, я излагаю некоторые основные термодинамические положения рапортовской теории генетического строения.

Итак:

1. Онтометрическое поле генетического материала богаче большинства других энергетических систем. Благодаря этому оно не просто укладывается в рамки первого закона термодинамики, но значительно их расширяет, обещая со временем значительно дифференцировать категорию, ныне известную как «химическая энергия», в которой нельзя не уловить иногда известного произвола по сравнению с понятиями энергии тепловой, электромагнитной и т.д., достаточно монолитными.
2. В физике известны три нулевых (стационарных) состояния: 1) движение элементарных частиц на орбитах в очень широком диапазоне температур, причем даже самых жестких термических условиях, 2) тепловая теорема (закон) Нернста, согласно которой вблизи точки Кельвина (-273°C) все молекулы полностью теряют подвижность и в микросистемах нет никаких энергетических проявлений, 3) состояние дискретного микрогенетического аппарата, способного сохранять стационарность в условиях, где это для других

молекулярных тел невозможно; генетическим телам приписывается свойство сохранять замечательную упорядоченность и настоящее существование в температурном диапазоне $T = 300K \pm (25^\circ\text{C})$ и сопротивляться своему уничтожению, в то время как нуклеиновые кислоты в тех же условиях отмечены значительной величиной энтропии.

Нулевое состояние отнюдь не всегда является самым инертным, адекватным покою, а представляет собой, наоборот, наиболее вероятное условие развертывания внутреннего поля элементарного тела. Нулевое состояние можно считать очень значимым в том смысле, что отсутствуют энергетические помехи для развертывания всего интерьера стационарного поля. Нулевое состояние автоматически определяет нулевую энтропию генной структуры. Система не может перейти в состояние с энергией меньшей нулевой энергии без изменения структуры системы. Генетические нуклеотиды не могут перейти в состояние ниже самих себя, иначе они превратятся в химическую структуру, поэтому нуклеотиды находятся на нулевом уровне.

В микрогенетическом материале почти всех живых форм наблюдается один и тот же чрезвычайно жесткий стандарт состава ансамбля аминокислот и нуклеотидов. Этот лимитированный набор структурных членов остается почти неизменным в течение всей продолжительной истории развития живого. Нулевая энтропия, которая поддерживается лишь в триплетах и нуклеотидах, находящихся внутри генов, далеко превосходит по упорядоченности все без исключения молекулы. Свободные нуклеотиды и триплеты поэтому не могут без участия матрицы, создать генную структуру,

хотя это однажды произошло или изредка происходит в спонтанном порядке.

3. Генные и фермионовые системы наделены стационарностью. Участвующие в аутокатализе тела в условиях диапазона нормальных физиологических температур на несколько сот градусов выше абсолютного нуля по энтропии не отличаются от нулевого состояния фермионов. Сравнение именно со свойствами фермионов нулевого уровня, а не с объектами, нормируемыми третьим законом термодинамики, обусловлено способностью генных материалов очень активно двигаться с полной нагрузкой на молекулярные степени свободы и участвовать в синтетических процессах. Молекулы теоремы Нернста вблизи точки Кельвина (абсолютного нуля) в реактивном отношении полностью иммобилизованы и от всей нагрузки на молекулярные степени свободы остается лишь крайне бледный фон. При $K = 0$ молекулы теряют энтропию, и только в этом случае достигается нулевая неупорядоченность или абсолютный порядок.
4. Генное состояние, заметно отклоняющееся от химической термодинамики, может быть более точно определено с помощью средств, примененных Нернстом при выведении условий нулевого уровня для химических тел; при условии $T = 0$, $\lim \frac{dQ}{dT} = \lim \frac{dA}{dT} = 0$, и величина dS тогда бесконечно близко приближается к 0. Для генного состояния действуют генетические факторы, родственные Q и A Нернста, которые обозначаются как $Q_{\text{ген}}$ и $A_{\text{ген}}$. Примем условия стационарности для $Q_{\text{ген}}$ и $A_{\text{ген}} = (Q_{\text{ген}}, A_{\text{ген}})_{\text{стац.}}$, и получим отсюда нулевой уровень энтропии: $(Q_{\text{ген}}, A_{\text{ген}})_{dS} = 0$ при $T = 300\text{K} \pm 25^\circ\text{C}$.

Заметно выше T предела (52°C и выше) теряется стационарность и есть предпосылки для получения положительных значений dS (деградации от $dS = 0$ к $dS > 0$) с результатом в виде $(Q_{\text{ген}}, A_{\text{ген}})_{dS}$, т.е. потери генного состояния и распада генетической структуры до химического уровня.

При снижении окружающей температуры сохраняется $dS = 0$, прекращается вызванная условием $E_{\text{ген}} < 1$ активная работа генного поля и оно выдерживает постепенное снижение T до точки Кельвина; генная форма, приближаясь к уровню Нернста, не переходит в него необратимо. В отличие от химических тел, с обратным повышением температуры от абсолютного нуля до оптимального диапазона физиологических температур генное состояние полностью восстанавливается, в генах не растет dS .

Таким образом, в генетической структуре в целом налицо параметр нулевой энтропии $dS = 0$.

5. При статистическом истолковании третьего принципа термодинамики вероятность состояния наименьшей энергии есть $P_0 = 1$, отсюда $S = k \cdot \ln P_0 = k \cdot \ln P_1 = 0$. При условиях, когда $dS = 0$ генного состояния есть функция внутригенных свойств 64 триплетов, статистическая вероятность попадания в состав новой генной цепи нуклеотида и триплета, испытавшего действия генетического поля и активной матрицы, есть $P_{\text{ген}} = 1$, что связано с прогрессом квантовой природы. Поэтому в согласии с формулой $S = k \cdot \ln P$ получаем для генетического распределения:

$$S = k \cdot \ln P_{\text{генетическое поле (матрица)}} = k \cdot \ln P_{0\text{ген}} = k \cdot \ln 1 = 0.$$

Итак, изложенные условия предусматривают нулевую энтропию при $\sim 300K$, в отличие от закона Нернста.

6. При температуре абсолютного нуля сохраняются простейшие генетические формы, однако основные функции у эукариот и прокариот развертываются при температуре, близкой к $30^\circ C$, одновременно благоприятной как для генетических преобразований, так и для метаболических, в первую очередь ферментативных.

Аутокаталитическая и митотическая деятельность генов обусловлена тем, что в них сохраняется $dS = 0$ при $E_{\text{ген}} = A_{\text{ген}} + Q_{\text{ген}}$. При этом уровень $dS = 0$ выражен в упорядоченной структуре и на базе стационарного движения, создающего более выгодные условия для активности генного поля.

7. В огромном большинстве генное дублирование безупречно. А минимальными, выраженными дискретно отклонениями с частотой 10^{-9} (или в пропорции 1:9000000000) в расчете на триплеты по данным определений спонтанного мутагенеза, можно пренебречь, поскольку аутокатализ способен превращать единичные мутационные события в тождественные множества. Генные мутации и хромосомные перестройки идут на фоне практически 100%-го полезного выхода аутокатализа. Очень близкая минимальная пропорция отступления от вероятности характерна и для образования в гетеросинтезе информационных нуклеиновых кислот. Вместе это делает частоту отступления от $S_{\text{ген}} = k \cdot \ln P_{\text{ген}} = 0$ не выше 10^{-9} , а отсюда налицо массовое положение генов на нулевом уровне во время аутокатализа.

В чем специфика аутокатализа? Потенциал химического катализа сильно ограничен нестойкостью структуры химических органических веществ, которые распадаются в сравнительно

короткое время. Между тем наблюдаемое в генетике прямо или косвенно тождество генотипов "срабатывающих" миллионы и миллиарды раз на полную аутокаталитическую мощность, для химического катализа решительно невозможно. При этом можно пренебречь происходящими в эволюции мутациями в силу очень малого удельного веса. Химические атомы и молекулы не способны на создание себе подобных, а генетические атомы (*гены*) способны в силу своего фундаментального значения. Самообновление функционирующего катализатора неизвестно в химическом катализе.

В чем специфика энтропии аутокатализа? Для химии характерно весьма гладкое угасание реакции при снижении температуры, тогда как аутокатализ отвечает на низкий предел t , как и на высокий. Хотя высокие t должны были бы влиять на хромосому, находящуюся в окружении молекул и ионов, разрушительно.

Деграция от доминантного к рецессивному состоянию, протекающая при искусственном отборе, завершаемая переходом от адаптивного в неадаптивное состояние, очень резко снижает общую приспособленность, однако, подчеркнем, без какого-либо повышения при этом величины энтропии на генетическом уровне. В процессе аутокатализа, гетеросинтеза во всех этапах митотического преобразования сохраняется равноправие доминантных и рецессивных генов.

Химические мутагены добавляют к нормальным аутокаталитическим комплексам еще искусственные. Рождение мутации после конфликта химического мутагена с генетическим строением, воскрешает гомогенность естественной микрогенетической дискретности, но в ином конкретном выражении.

Иногда прибавляются микрогенетические единицы, иногда происходит перестановка порядка их чередования, но все чаще бывают потери. Минимальные отклонения выражены дискретно. В целом генетическая материя способна к перемене состояния без потери привилегированной структуры и стационарности. В этом термодинамическое своеобразие микрогенетического аппарата.

8. Другим показателем термодинамического своеобразия генной структуры служит ее способность сохраняться в сухих семенах и спорах микроорганизмов в течение больших или очень больших промежутков времени. Многие споры выдерживают длительное кипячение и другие жесткие воздействия, вызывающие деградацию в примерно сходных по сложности химических структурах.
9. О своеобразии микрогенетического материала говорит его способность блестяще отражать широкий фронт усилий большинства физических агентов вызывать обычное повышение беспорядочности.
10. Развитие живых форм, прослеженное в виде последовательности стойких видовых эталонов, направлено в сторону совершенствования – морфологического и физиологического, а поэтому явно противоречит стремлению энтропии к максимуму на нашей планете.
11. Генетическая структура обладает крайне малой энтропией, пока она находится в нормальном состоянии в окружении внутренней клеточной среды. Без этого не возникла бы упорядоченность, убывающая от гена к иРНК, а от нее к ферменту. Изменение условий химического окружения вызывают подъем энтропии изолированных генетических субъединиц и их гибель. Гибель генома возможна также при возникновении доминантных или рецессивных леталей, несбалансированности хромосомных материалов.

Теперь вкратце: «...если согласно выражению Нернста-Планка энтропия однородного твердого или жидкого химического вещества обращается в нуль при абсолютном нуле температуры, $\lim S = 0$ при $T \rightarrow 0$ и если для химических молекул известная положительная энтропия является при $300K$ обязательной фундаментальной характеристикой, то для генетической субстанции термодинамика позволяет выразить специфический новый нулевой уровень $\lim S = 0$ при $T \rightarrow \sim 300K$, осуществляемый при оптимальной физиологически температуре. То есть генетическое состояние располагает дезэнтропической характеристикой ($T > 0, -dS$) во всем температурном диапазоне, при котором протекает активная жизнь».

Этот постулат, по-моему твердому убеждению, должен войти в историю и теорию науки, как четвертое начало термодинамики или закон Рапопорта.

В этой связи хочется верить, что придет время, и имя Иосифа Абрамовича Рапопорта будет стоять в одном ряду не только с именами Менделя, Моргана, Меллера, Кольцова и Вавилова, но и с именами Клаузиуса, Больцмана, Гиббса, Планка, Нернста, Сциларда, Шеннона.

Что касается «Микрогенетики», впервые объединившей идеи генетики и биологии с идеями атомистики, квантовой физики, классической термодинамики, физической химии, то она давно уже стала большой библиографической редкостью, практически недоступной широкому читателю. В ней, как, впрочем, и во всех последующих теоретических исследованиях, базирующихся на огромном экспериментальном материале, Рапопорт преследовал одну цель – создание единой непротиворечивой теории становления и развития органического мира, установление единства живой и мертвой природы.

Его мировидение, язык, манера изложения отличаются очень многим от традиционных общепринятых. Без преувеличения могу сказать: когда погружаешься в чтение «Микрогенетики» испытываешь наслаждение и напряженное движение ума, по силе сопоставимые с чтением «Фауста» Гете или «Мастер и Маргарита» М.А.Булгакова. Эта вечно современная книга, на мой взгляд, еще вызовет огромный интерес у специалистов, занимающихся синергетическими проблемами.

Использованная литература

- Гладышев Г.П. 2004.** Второе начало термодинамики и эволюция живых систем // <http://www.endeav.org/evolut/text/EJMAPS2004/EJMAPS2004.pdf>.
- Захидов С.Т. 2004.** Генетический хаос: могильная тишина или тишина колыбели // Синергетика, М., т.7, с.169-197.; <http://spkurdyumov.narod.ru/Zachidov10.htm>.
- Казарян В.П. 2006.** Время в термодинамике // http://www.chronos.msu.ru/TERMS/kazaryan_vremya_termodinamika.htm.
- Клайн Б. 1971.** В поисках: Физики и квантовая теория // М., Атомиздат, 288с.
- Климонтович Ю.Д. 2000а.** Введение в физику открытых систем. I. // В кн.: Синергетика, М., изд-во МГУ, т.3, с.100-120.
- Климонтович Ю.Д. 2000б.** Введение в физику открытых систем. II. // там же, с.121-142.
- Линднер Г. 1977.** Картины современной физики // М., изд-во «Мир», 272с.
- Мах Э. 1909.** Познание и заблуждение // М., изд-во Скримунта, 471с.
- Мах Э. 1909.** Научно-популярные очерки // СПб, изд-во «Образование», 340с.
- Нернст В. 1923.** Мироздание в свете современной науки // Петроград, 82с.
- Планк М. 1925.** Физические очерки // М., Госиздат, 136с.
- Пригожин И., Стенгерс И. 2000а.** Порядок из хаоса. М., изд-во Эдиториал УРСС, 312с.
- Пригожин И., Стенгерс И. 2000б.** Время, хаос, квант. М., изд-во Эдиториал УРСС, 240с.

- Рапопорт И.А. 1965.** Микрогенетика. М., изд-во «Наука», 427с.
- Рапопорт И.А. 1972а.** Модель формирования генетического вещества // В кн.: Химический мутагенез и создание селекционного материала, М., изд-во «Наука», с.13-43.
- Рапопорт И.А. 1972б.** Сопряжение созидательных процессов на генетическом и селекционном уровнях // там же, с.43-72.
- Рапопорт И.А. 1973а.** Развитие структуры компакта Дирака в генетическом строении // В кн.: Применение химических мутагенов в сельском хозяйстве и медицине, М., изд-во «Наука», с.7-46.
- Рапопорт И.А. 1973б.** Природа интеграции и отображения в генетическом атомизме // там же, с.47-76.
- Рапопорт И.А.1993.** Две системы прерывности и термодинамическая флуктуация в генетическом строении // Химический мутагенез и задачи сельскохозяйственного производства, М., изд-во «Наука», с.3-24.
- Рапопорт И.А. 1996.** Гены, эволюция, селекция. Избранные труды. М., изд-во «Наука», 249с.
- Родный Н.И., Соловьев Ю.И. 1969.** Вильгельм Оствальд // М., изд-во «Наука», 375с.
- Руденко А.П. 2000.** Самоорганизация и синергетика // В кн.: Синергетика, М., изд-во МГУ, т.3, с.61-99.
- Седов Е. 1982.** Одна формула и весь мир // М., изд-во «Знание», 175с.
- Шамбадаль П. 1967.** Развитие и приложение понятия энтропии // М., изд-во «Наука», 280с.
- Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. 1967.** Фейнмановские лекции по физике // М., изд-во «Мир», т.4, с.99-123.
- Хазен А.М. 2000.** Разум природы и разум человека // М., изд-во «РИО», 607с.
- Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. 2001.** Физика процессов эволюции // М., изд-во Эдиториал УРСС, 328с.

Эбелинг В., Фастель Р. 2005. Хаос и космос. Принципы коэволюции // <http://spkurdyumov.narod.ru/Ebel1.pdf> (I-IV главы),

<http://spkurdyumov.narod.ru/Ebel2.pdf> (V-VII главы).

Шредингер Э. 1947. Что такое жизнь? С точки зрения физика // М., ИЛ, 146с.

Bricmont J. 2006. Science of chaos or chaos in science? // <http://www.chronos.msu.ru/EREPORTS/bricmont.htm>.

Denbigh K.G. 2006. Note on entropy, disorder and disorganization // <http://www.endeav.org/evolut/text/denbig1/denbig1e.htm>.