

К. РЕБАНЕ

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОНЯТИЯ ЭНТРОПИИ В БИОЛОГИИ И ПРОБЛЕМАХ ЗАЩИТЫ ПРИРОДЫ

В целях дальнейшего развития темы предыдущих публикаций [1] рассматриваются два вопроса: 1) некоторые стороны использования понятия физической энтропии в биологии; 2) законность и целесообразность критерия энтропии в проблемах защиты природы. Показано, что имеющаяся в работах [3, 4] критика в адрес Шредингера [5] является несостоятельной: в процессах, происходящих в живых организмах, в конечном счете определяющую роль играет энтропия (негэнтропия), как правильно указывал Шредингер, а не свободная энергия, как полагают авторы работ [3, 4]. Подчеркивается, что энтропия и закон ее возрастания дают хотя только одну, но надежную и очень важную опорную точку для рассмотрения проблем биологии и защиты сферы жизни. При этом совершенно ясно, что одной энтропии явно недостаточно для описания всего существенного в неравновесных состояниях и процессах, в особенности такой сложнейшей и крайне неравновесной системы как сфера жизни на Земле.

Указано на любопытную возможность поиска внеземных цивилизаций: так как необходимым условием обеспечения жизни и производственной деятельности высоко развитой цивилизации является отвод деградированной энергии в мировое пространство в виде длинноволнового высокоэнтропийного излучения, то следует считать одним из наиболее вероятных путей обнаружения внеземных цивилизаций поиски такого излучения (подвергнутого, быть может, специальной модуляции).

I

Обсуждение проблемы энтропии продолжается в советской биологической литературе (см., напр., [2-4]). Рассмотрим ниже критически основные положения недавней статьи А. И. Зотина «По поводу использования понятий энтропия и негэнтропия в биологии», опубликованной в общетеоретическом биологическом журнале [3].

Предмет обсуждаемой работы А. И. Зотина безусловно интересен и заслуживает внимания как биологов, так и физиков. Положения статьи о применимости второго начала термодинамики к явлениям, происходящим в живых организмах, правильны и актуальны.

Однако работа А. И. Зотина, особенно ее часть «Энтропия и негэнтропия», содержит также ряд неточных формулировок и некоторые ошибочные утверждения, могущие служить основой к возникновению новой путаницы.

Прежде всего следует заметить, что отрицательную энтропию по Шредингеру, т. е. энтропию, взятую с обратным знаком [5], можно коротко называть и негэнтропией. Это теперь так и принято, потому что часто вместо возрастания энтропии

удобнее говорить об убывании негэнтропии. Никаких новых проблем по существу здесь не возникает.

Связь энтропии или негэнтропии с количеством информации, подробно исследованная Бриллюэном [6], является самостоятельной и очень существенной проблемой принципиальных возможностей добывания информации в физическом эксперименте, ее записи и хранения. При рассмотрении основной роли физической энтропии или негэнтропии в макроскопических сильно неравновесных системах эту проблему можно вообще не поднимать.

Далее необходимо заметить, что понятия потока и производства энтропии, играющие важную роль в термодинамике необратимых процессов, не исключают, а предполагают понятие энтропии. Энтропия имеет смысл также применительно к сильно неравновесным системам. Обычная равновесная термодинамика (термостатика) и равновесная энтропия весьма полезны для описания и неравновесных необратимых процессов, если только задача может быть сведена к сравнению равновесных или квазиравновесных состояний. В очень большом массиве задач это возможно — и в этом сила обычной термодинамики.

Наши основные замечания сводятся к следующему.

1. Не следует экстраполировать выводы термодинамики необратимых стационарных процессов, полученные в линейном приближении теории, за пределы применимости этого варианта теории. В частности, теорема о минимальной продукции энтропии в стационарном состоянии справедлива только в линейном приближении и перестает быть применимой к процессам, протекающим в более сильно неравновесных условиях и требующим нелинейного описания. К последним следует отнести многое, в том числе наиболее интересное в биологии. Открытые системы могут уже в термодинамическом приближении* эволюционировать к гораздо более интересным состояниям, чем унылые стационарные процессы с минимальной продукцией энтропии: при наличии сильных отклонений от равновесия могут возникать, и в некотором смысле необходимо возникают, подсистемы с локальным и относительно устойчивым увеличением негэнтропии [7, 1].

При еще больших отклонениях от равновесия, когда теряет смысл свободная энергия Гиббса, приходится обращаться к существенно кинетическим описаниям.

2. Энтропия сохраняет смысл для весьма далеких от равновесия систем и состояний, остается в силе также закон ее возрастания. Статистическая физика указывает принципиальные возможности и общие формулы для ее вычисления. Для достаточно простых систем в неравновесных состояниях энтропия может быть вычислена и конкретно. При этом совершенно очевидно и бесспорно, что одной лишь энтропии, представляющей собой важную, но все же усредненную характеристику, недостаточно для описания всего существенного в весьма сильно неравновесных явлениях. Чем сложнее система и чем в более исключительной ситуации она находится, тем больше сведений требуется для знания существенного об этой системе.

Аналогично тому, как система может иметь одно и то же среднее значение энергии (одну и ту же внутреннюю энергию) в двух совершенно различных по другим параметрам (распределение давлений, скоростей частиц, масс и многие другие) неравновесных состояниях, она может иметь одни и те же значения неравновесной энтропии в двух

* В приближении, в котором для описания системы имеет смысл применить термодинамический потенциал Гиббса, т. е. где наряду с энтропией имеют смысл такие термодинамические равновесные или локально квазиравновесные характеристики, как температура, давление и др.

состояниях, сильно различающихся между собой многими другими важными и яркими свойствами и показателями. **

Аналогия идет еще дальше в том отношении, что как внутренняя энергия, так и энтропия подчиняются строгим физическим законам: закону сохранения энергии (первому началу термодинамики) и закону возрастания энтропии (второму началу термодинамики). Благодаря этому как концепция энергии, так и концепция энтропии, несмотря на то, что они описывают далеко не все и отнюдь не все существенное, приобретают все же чрезвычайно важное общее значение в физике, биологии и других естественных науках. Каждая из этих концепций дает только одну, но зато надежную опорную точку для развития теоретических и экспериментальных исследований в духе точной науки.

Чем сложнее система, чем в более сложной ситуации она находится, чем больше требуется о ней знать, тем объективно сложнее задача ее описания и тем больше сведений требуется о ней добыть. Из первого и второго начал термодинамики мы знаем только два факта: энергия системы в целом сохраняется, энтропия системы в целом возрастает. Но это уже очень много! Совершенно другой вопрос, что этого еще недостаточно для решения и постановки многих задач физики и, в особенности, биологии.

3. Критика в адрес Шредингера, имеющаяся в рассматриваемой статье, является несостоятельной.

Авторы работ [3, 4] полагают, что Шредингер ошибается, считая негэнтропию той термодинамической характеристикой, которая актуальна в процессах жизнедеятельности организма. В частности, Шредингер писал, что организмы непрерывно создают «порядок из порядка» в том смысле, что «извлекают упорядоченность из окружающей среды» в виде «хорошо упорядоченного состояния материи в пищевых продуктах» [5] (см. также [2]). Это утверждение Шредингера было подвергнуто критике А. Г. Пасынским [4]. А. Г. Пасынский, а вслед за ним и А. И. Зотин, считают, что организмы извлекают из окружающей среды не упорядоченность, мерой которой является негэнтропия, а свободную энергию. Аргументом против точки зрения Шредингера А. Г. Пасынский считает то обстоятельство, что при пищеварении происходит полная деградация упорядоченных молекул белка, что можно питаться и простой смесью аминокислот.

Заметим прежде всего, что Шредингер пользуется не имеющими точного физического содержания упрощенными выражениями «порядок» и «беспорядок» в целях наглядности. Точным физическим понятием, которое он имеет в виду в своей книге [5], является энтропия (негэнтропия). Поэтому истинный смысл его слов заключается в формулировке основного свойства баланса энтропии в процессах между организмом и окружающей средой, или, в терминах термодинамики необратимых процессов, — баланса потоков и производства энтропии. Эти процессы обязательно должны согласовываться с принципом возрастания энтропии системы в целом, причем специфика живого организма в том и заключается, что он поддерживает себя на относительно низком уровне энтропии (или, что то же, — на высоком уровне негэнтропии) за счет увеличения энтропии окружающей среды (или уменьшения ее негэнтропии). Для этого окружающая среда должна быть достаточно далека от состояния термодинамического равновесия и содержать

** Конечно, для полного описания равновесного термодинамического состояния одной лишь внутренней энергии или энтропии тоже недостаточно, но число необходимых для полного описания параметров невелико. В случае сильно неравновесных состояний набор возможных ситуаций при заданных энергии и энтропии становится несбычайно разнообразным.

достаточные запасы негэнтропии. Иными словами, она должна быть в достаточно «упорядоченном состоянии»: для животных содержать пищу, воздух и т. д., для растений — высококачественное солнечное излучение, воду и многое другое. Присутствие и развитие жизни ускоряет процессы роста энтропии в окружающей среде. Именно эту ситуацию Шредингер и описывает упрощенно как извлечение организмами «упорядоченности из окружающей среды» и создание «порядка из порядка».

Более точно (но также упрощенно, в духе приведенных выше популярных формулировок в знаменитых лекциях Шредингера [5]) следовало бы сказать, что жизнь творит «порядок из порядка, создавая локальный и временный порядок в актуальных для нее подсистемах за счет (значительного) увеличения беспорядка в малоактуальных для нее частях системы»***.

Еще более упрощенная формулировка «жизнь творит порядок из порядка, ускоряя рост общего беспорядка», хотя и содержит верное утверждение и звучит интригующе, является применительно именно к жизни существенно неполной. Эта формулировка исчерпывающа для процессов в изолированной системе неживой природы. Если ее усовершенствовать до точного физического смысла, то мы вернемся просто к закону возрастания энтропии. В этой формулировке опущена специфическая и самая существенная для энтропийных процессов в живом сторона: перемещение роста энтропии в малоактуальные или неактуальные места и части большой системы, извлечение от тех частей вещества и излучения, которые являются носителями высокой энтропии (деградированной энергии), в результате чего в актуальных для жизни частях системы энтропия локально уменьшается (создаются высокоорганизованные структуры и повышается качество энергии).

Такое представление полностью совпадает с картиной развития жизни на Земле. Жизнь возникла, развивалась, развивается и существует за счет негэнтропии излучения Солнца. Актуальной подсистемой с точки зрения жизни на Земле в целом является биосфера, неактуальной — мировое пространство, в которое уходит деградированное на Земле излучение. С точки зрения отдельного организма актуальной подсистемой является сам организм, неактуальной — окружающая его среда.

Деградация упорядоченных молекул белка при пищеварении легко объяснима: не может же организм иметь огромный набор различных сложнейших программ усвоения пищи, каждая — для максимально эффективного усвоения данного конкретного сорта пищи. Более целесообразно иметь хорошо отработанные схемы усвоения сравнительно малого числа более простых, но часто встречающихся стандартных исходных соединений и схемы сведения сложных веществ до этих исходных соединений. Вторые схемы могут быть несравненно проще первых, так как они должны в конечном счете обеспечить протекание реакций в сторону увеличения энтропии (однако, отнюдь, не до полной деградации упорядоченности на молекулярном уровне).

Теперь относительно роли свободной энергии. Действительно, в химических реакциях, протекающих в живых системах, передается энергия и переносится вещество, притом часто в таких условиях, что эти реакции можно и целесообразно характеризовать свободной энергией. Однако из баланса энергии и вещества нетрудно усмотреть, что в конечном итоге всего цикла химических и физических процессов изменяется (возрастает) только энтропия системы «организм + окружающая среда». Свободная энергия взрослого организма остается более-менее неизменной. Если же рассматривать замкнутые циклы (а

*** Можно было бы еще сказать: «...актуальный порядок из неактуального порядка, покрывая неизбежное общее увеличение беспорядка ростом неактуального беспорядка».

именно их и следует прежде всего рассматривать в связи с проблемами энтропии), то свободная энергия организма не изменяется. Достаточно рассмотреть наглядный пример — годовой цикл развития и гибели растительности. Взрослый организм в полном соответствии с неравновесной термодинамикой поддерживает в себе высокую степень упорядоченности в конечном счете благодаря именно увеличению энтропии окружающей среды.

Формулы (11) и (12) в статье [3] верны, но их интерпретация вызывает недоумение. Во-первых, заметим, что энтропия и свободная энергия отличаются друг от друга уже по размерности (температура в качестве множителя). Во-вторых, и это главное, формулу (12) можно трактовать и так, что для поддержания необходимых для жизни химических реакций нужен поток неэнтропии из окружающей среды, а внутри организма (который считается находящимся в стационарном состоянии!) в итоге вообще ничего не изменяется.

Итак, путаницы у Шредингера нет и его упрощенное подытоживающее высказывание о том, что организм поддерживает себя на высоком уровне упорядоченности (отрицательной энтропии) благодаря тому, что он «непрерывно извлекает упорядоченность из окружающей среды», и образно, и верно.

II

В наших предыдущих заметках [1] была рассмотрена энтропия в связи с охраной природы в условиях все возрастающей производственной деятельности человека. Представляется ясным, что к этому кругу проблем критерий физической энтропии можно и следует смело применять. В самом деле, здесь в первую очередь речь идет о циклических производственных процессах в неживой природе, подчинение которых закону возрастания энтропии ни у кого не должно вызвать возражений. Однако может показаться, что дело осложняется, когда в рассмотрение включают процессы, в которых участвует живая природа. Но и здесь сомнения отпадут, если рассмотреть результат, оказываемый деятельностью живых существ на окружающую неживую природу, т. е. на энтропийные характеристики воздуха, воды, почвы, солнечного излучения. Не может же быть возражений против применимости энтропии к воздуху, воде, почве, излучению — к объектам, хорошо и ясно характеризваемым их физическими свойствами. Бесспорно также, что любой цикл жизнедеятельности в итоге увеличивает энтропию в окружающей среде. В общем балансе роста энтропии для системы «излучение Солнца + Земля + уходящее от Земли излучение» значение имеет только конечный результат деятельности животного и растительного мира. С точки зрения общего баланса он совершенно бесспорно сводится к увеличению энтропии. Остальные, более детальные рассуждения, включая количественные оценки, мы можем относить уже только к традиционным и простым (в сравнении с биологическими) объектам физики — к излучению, воздуху, воде, почве.

При таком простом и характерном для физики подходе остается в стороне целый цикл вопросов о применимости энтропийных характеристик к самому живому, а также дальнейшие проблемы, например, как появилась и развивается жизнь, достаточно ли известных на сегодня законов физики для понимания процессов в живом, существует ли в конце концов особая «жизненная сила» и т. п. В вопросе возможности и актуальности применения понятия энтропии в проблематике охраны природы нет необходимости поднимать эти нерешенные проблемы, интересные и актуальные в биологии.

Не приходится надеяться на открытие «антиэнтропийных» процессов и использование их в целях очищения окружающей среды от отходов производства и ликвидации нежелательных результатов нарушения природного равновесия. Открытие таких процессов было бы, конечно, чудесным, но нельзя же строить будущее на вере в чудо. Имеются реальные перспективы разрешить проблему энтропии без необоснованных попыток нарушить второе начало термодинамики. Эти перспективы связаны с более полным использованием негэнтропии солнечного излучения и увеличением энтропии уходящего от Земли в мировое пространство деградированного излучения.**** Этот путь был бы для нас ничем не хуже «антиэнтропийного чуда».

Энтропия имеет фундаментальное значение как общий физический критерий состояния вещества и излучения. Некоторый низкий уровень ее является необходимым условием сохранения и развития жизни и производственной деятельности. Необходимые и достаточные условия для должного обеспечения жизни на Земле несравненно более разнообразны — для формулировки этих многообразных условий потребуются многие сложные и взаимосвязанные показатели и критерии.

Иными словами, энтропия никак не может считаться единственно важной характеристикой такой сложнейшей системы как ноосфера и биосфера Земли. Критерий энтропии дает только одну опорную точку, но эта опора надежная. Критерий энтропии невозможно игнорировать, ибо он сам о себе напоминает. Эти напоминания постепенно перерастают в предупреждения, грозность которых в тех частях Земли, где ими пренебрегают, нарастает с каждым годом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ребане К., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 19, 203 (1970); 20, 247 (1971).
2. Волькенштейн М. В., Молекулы и жизнь, М., 1965.
3. Зотин А. И., Ж. общей биол., 32, 27 (1971).
4. Пасынский А. Г., Биофизическая химия, М., 1963.
5. Шредингер Э., Что такое жизнь с точки зрения физики, М., 1947.
6. Бриллюэн Л., Наука и теория информации, М., 1960.
7. Prigogine I., In: Theoretical Physics and Biology, Ed. by M. Marois, North-Holland Publishing Company, Amsterdam—London, 1969, p. 23.

Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
15/II 1972

К. REBANE

ENTROOPIA MÕISTE KASUTAMISEST BIOLOOGIAS JA LOODUSKAITSES

Eelmistes publikatsioonides [1] käsitletud teema jätkuna vaadeldakse kahte küsimust: 1) füüsikalise entroopia mõiste kasutamist bioloogias ja 2) entroopiakriteeriumi rakendamise põhjendatust ja otstarbekust looduskaitstes.

Näidatakse, et artiklites [3, 4] Schrödingeri aadressil tehtav kriitika on alusetu: elusorganismides toimuvates protsessides on lõppkokkuvõttes määrav roll just nimelt

**** Из необходимости организовать сохранность сферы жизни за счет дополнительной деградации уходящего излучения высокоразвитыми цивилизациями следует любопытная возможность их обнаружения во вселенной. Действительно, посылка специальных мощных сигналов стоит очень много негэнтропии и тем самым сильно портит условия в сфере жизни. Разумно доверить роль носителя информации о существовании цивилизации мощному потоку длинноволнового излучения, отводимому в мировое пространство с целью «охлаждения». Этот поток, распространяющийся во всех направлениях, можно подвергнуть также специальной модуляции, например, по интенсивности.

entropiaal (negentropiaal), nagu seda õigesti väitis Schrödinger [5], aga mitte vabal energial, nagu seda arvavad tööde [3,4] autorid.

Kriipsutatakse alla, et entroopia ja selle kasvu seadus annavad ainult ühe, kuid kindla ja seetõttu bioloogia ja keskkonna kaitse probleemide käsitlemiseks ülimalt tähtsa pidepunkti. Seejuures on vaieldamatult selge, et ainuüksi entroopiast on vähe kirjeldamiseks kõike olulist mittetasakaalulistes olekutes ja protsessides. Oeldu kehtib iseäranis taolise ülimalt keeruka ja äärmiselt mittetasakaalulise süsteemi kohta, nagu seda on maakera elukeskkond.

Juhitakse tähelepanu huvitavale väljavaatele Maa-väliste tsivilisatsioonide leidmiseks. Tuleb arvata, et igasuguse kõrgele arenguastmele jõudnud tsivilisatsiooni elu ja tootmistegevuse tagamise vajalikuks eelduseks on vabanemine degradeerunud energia-hulkadest: need tuleb suunata maailmaruumi pikalainelise kõrge entroopiaga kiirguse riäl. Siit tulenebki, et on mõtet otsida Maa-väliseid tsivilisatsioone taoliste kiirgusvoogude järgi. Kui tsivilisatsioon ise on huvitatud väljastama teateid oma olemasolust, on igati alust arvata, et ta ei hakka saatma võimsaid spetsiaalseid madala entroopiaga signaale, sest see oleks paratamatult seotud väga suurte negentropiakuludega ehk elukeskkonna tohutult suure saastamisega. Mõistlik oleks kasutada neidsamu võimsaid heiteenergia vooge, moduleerides nendesse signaalid.

K. REBANE

ON THE USE OF THE CONCEPTION OF ENTROPY IN BIOLOGY AND IN PROBLEMS OF ENVIRONMENT PRESERVATION

A further discussion of the problems of physical entropy in biology and environment preservation is given [1]. It is shown that the criticism [3,4] of Schrödinger's point of view [5] about entropy (negentropy) being the vital thermodynamical function in the processes of life is groundless. If we consider the quasi-closed cycles of life processes (which is useful to do in connection with thermodynamical entropy considerations), it turns out very definitely in full accordance with Schrödinger's point of view [5] that in the end the only thermodynamical function of significance is entropy, but not free energy as supposed by the authors of [3,4]. Entropy and the second law of thermodynamics give only one, but very reliable and important point for discussing the problems of biology and environment preservation. It is clear that entropy alone is not enough for a complete description of all important properties of a non-equilibrium state; in particular, it is far from being sufficient for the description of the situation in such a most complicated and extremely non-equilibrium system as the sphere of life on the Earth.

A possibility of detecting civilizations in outer space is mentioned. As the necessary physical condition for the existence of every highly developed civilization seems to be leading degraded energy out of the system, transferring it in the space in the form of high-entropy long-wave radiation, it is reasonable to look for that kind of radiation as an evidence. On the other hand, we have to expect that civilization will use the same powerful energy flows, modulating them for sending signals about its existence (if it is found to make sense) instead of sending special low-entropy signals, which require gigantic amounts of negentropy and cause enormous damage to the environment.