

Энтропийный подход к проблемам устойчивого развития

ФИЦ «Информатика и управление» РАН

Соломатин Александр Николаевич, к.ф.-м.н.

a.n.solomatin@bk.ru

Энтропия и устойчивое развитие

Концепция **устойчивого развития** получила широкое распространение со времени международной конференции в Рио-де-Жанейро. Под устойчивым развитием понимается **«развитие, при котором удовлетворяются потребности настоящего времени, но не ставится под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои потребности»**.

На пути к устойчивому развитию планетарной цивилизации стоят многочисленные **глобальные проблемы**, такие как угрозы со стороны новых технологий, угроза мировой войны, общий кризис капитализма и западной цивилизации, расслоение на бедные и богатые страны, ослабление роли национальных государств, перенаселение планеты, рост международного терроризма и преступности, истощение природных ресурсов, экологические проблемы, глобальные изменения климата и т.д.

Эти проблемы **распространяются по цепочке** «мировая цивилизация-государство-регион-город-предприятие-индивид», влияя на жизнь каждого человека. При этом многие проблемы взаимно влияют друг на друга, усиливая негативный эффект за счет возникновения положительных обратных связей. И обострение этих проблем знаменует вступление планетарной цивилизации в эпоху **глобального фазового перехода в качественно новое состояние**.

Рост глобальной энтропии и прогрессирующая хаотизация характеризуются термином **«нестабильность»**, когда частота, скорость протекания, амплитуда, непредсказуемость и непривычность изменений постоянно возрастают при одновременном росте сложности проблем, требующих решения.

Глобальные проблемы обычно связаны с ресурсами: представляют собой либо **проблемы нехватки различных ресурсов (сырьевых, инвестиционных, технологических и т.д.) и борьбы за эти ресурсы либо негативного влияния загрязнений**, что накладывает соответствующие ограничения на перспективы устойчивого развития цивилизации в целом, отдельных стран и регионов.

Анализ свойств энтропии позволяет рассматривать проблемы устойчивого развития и экологические проблемы в частности как **проблемы роста энтропии в глобальной системе «планета Земля»**. Как изъятие невозобновляемых природных ресурсов (уменьшение информации), так и выбросы в среду загрязнений (увеличение энтропии) дают в итоге общий рост энтропийного загрязнения.

Свойства энтропии

Энтропия (информационная) – мера неопределенности информации, внутренней неупорядоченности и дезорганизации в системах любой природы.

Негэнтропия как связанная информация, наоборот, является мерой упорядоченности материи и мерой внутренней структурированности. Она рассчитывается аналогично энтропии, но действует противоположно ей, причем эти две величины изменяются по различным закономерностям и их значения мало зависят друг от друга.

Только живые системы могут действовать против всеобщего увеличения энтропии. По словам Шредингера, организм может оставаться живым, «только постоянно извлекая из окружающей его среды отрицательную энтропию. Отрицательная энтропия — это то, чем организм питается».

Основные **свойства энтропии**:

- чем больше число состояний системы и чем меньше отличаются их вероятности, тем больше энтропия;
- в изолированной системе энтропия не может убывать;
- **если энтропия системы убывает, то это сопровождается ростом энтропии в среде (других системах)**;
- при объединении систем энтропия H уменьшается вследствие образования новых структурных связей, т.е. $H(XY) < H(X) + H(Y)$ (теорема Шеннона для систем), где XY , X , Y – системы;
- энтропия и ее противоположность негэнтропия (информация) I для каждой конкретной системы связаны соотношением $H + I = \text{const}$; чтобы уменьшить энтропию, требуется внесение дополнительной информации, т.е. управление;
- для каждого уровня открытости конкретной системы существует свой баланс энтропии и негэнтропии, причем чрезмерное повышение негэнтропии автоматически вызывает соответствующий рост энтропии;
- при конкуренции систем за ограниченные ресурсы система с меньшим уровнем энтропии обычно притягивает больше ресурсов и быстрее развивается;
- информация самопроизвольно передаётся от системы с меньшей негэнтропией в систему с большей негэнтропией.

Энтропия и ограничения устойчивого развития

Из перечисленных свойств энтропии вытекают **определенные ограничения** на возможности равного устойчивого развития для систем различного уровня - государств, регионов, компаний:

- поскольку вероятность отсутствия порядка (число хаотических состояний) всегда намного выше, чем вероятность порядка, то функционирование любой системы – это непрерывное решение постоянно возникающих проблем;
- при взаимодействии стран, регионов, компаний с разным уровнем развития (негэнтропии) ресурсы всех видов автоматически перетекают от менее развитых систем к более развитым;
- **развитие цивилизации неминуемо влечет рост энтропии окружающей природной среды** в виде сокращения запасов ресурсов, негативных изменений и загрязнения среды;
- по мере экспансии цивилизации естественная среда постепенно исчезает, заменяясь на искусственную, и **цивилизация из открытой системы (в окружающей среде планеты Земля) все более превращается в замкнутую систему (совпадающую с сушей планеты)**;
- развитие любой системы (государства, региона, компании, индивида) всегда осуществляется за счет внешней среды (других систем);
- если энтропия среды становится больше энтропии системы, то система гибнет и растворяется в среде (принцип организационной деградации Хильми);
- для уменьшения энтропии системы требуются целенаправленные дополнительные усилия - осуществление управления, т.е. внесение дополнительной информации, увеличивающей открытость системы.

Динамика энтропии и диалектика

Динамика энтропии в системах носит нелинейный и циклический характер, когда без каких-либо внешних воздействий *периоды роста и уменьшения энтропии чередуются*.

- ❖ Уменьшение энтропии при объединении систем «работает» лишь до определенного уровня, что возможно, связано, с диалектическим законом переход количества в качество. Примеры – «загнивание» монополий, неэффективность сверхцентрализованных систем управления.
- ❖ По мере роста энтропии растёт хаотизация системы. Но поскольку хаос есть среда для рождения и самоорганизации нового, то, начиная с некоторого момента по закону *перехода количества в качество*, энтропия системы начинает уменьшаться (если, конечно, система не погибнет в силу роста хаотизации). Поэтому прогнозируется качественно новое состояние планетарной цивилизации после прохождения Большого антропного перехода.
- ❖ Было показано, что между уровнями энтропии и неэнтропии любой системы существует некоторый баланс, характерный именно для этой системы. Так, при сильном росте неэнтропии системы неумолимо будет расти и ее энтропия. Пример – проблемы экологии, пробок, преступности и наркомании в мегаполисах.
- ❖ В любой системе энтропия и неэнтропия образуют *диалектическую пару*, взаимодействие которых обеспечивает развитие системы; идентичные диалектические пары – добро и зло, инь и ян.

Борьба с энтропией

Вся история цивилизации представляет собой *непрерывную борьбу с энтропией* в самых различных областях – в политике, экономике и т.д. Наиболее радикальным способом решения энтропийных проблем (нехватки ресурсов и экологических проблем) всегда были захватнические войны и освоение новых территорий.

После исчезновения возможностей территориальной экспансии капитализму удавалось избежать тотального кризиса за счет постоянного экономического роста, постоянно расширяя систему за счет: отмены привязки к золотому стандарту, развития культа потребления, роста банковского кредитования, использования огромного нового рынка после краха СССР и соц. системы, развития ИТ и Интернета. *Но сейчас цивилизация оказалась в условиях «полного мира» по Г. Дейли, когда расширяться более некуда.*

В настоящее время оба направления фактически закрыты; в качестве их современного аналога можно рассмотреть *переход от «двумерной» к «трехмерной» модели* внешней среды: имеется в виду освоение космоса, Мирового океана и подземного пространства как источников ресурсов и стоков для загрязнений.

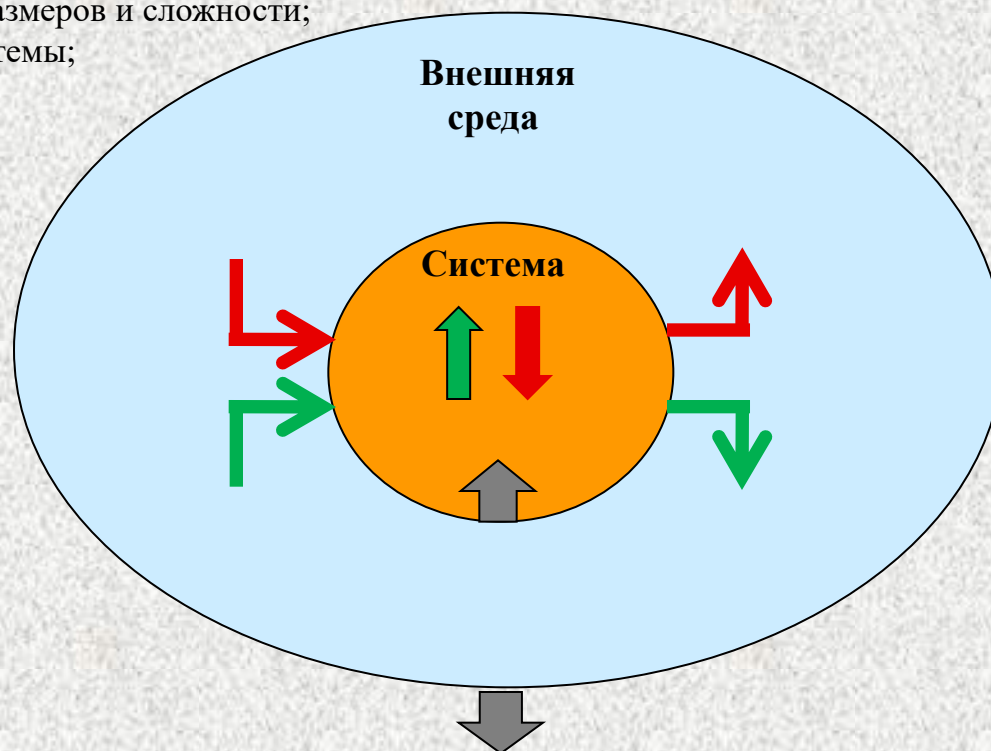
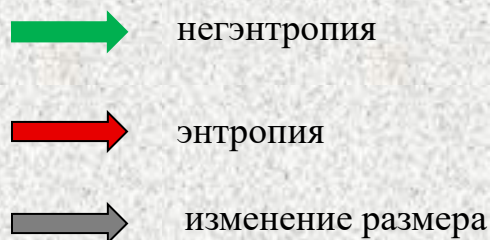
В силу свойств энтропии, ресурсы, капиталы, трудовые ресурсы *всегда будет перетекать* из страны с меньшим уровнем развития (негэнтропии) в страну с *большим* уровнем развития. Поэтому слаборазвитые страны обычно являются поставщиками сырья, а движение денег происходит от рынка потребителей к рынку производителей. Этот механизм в полной мере справедлив для России, которая несколько десятилетий постоянно экспортирует негэнтропию, повышая свой энтропийный уровень

Неприемлемым вариантом мирового развития и борьбы с энтропийным загрязнением является сокращение цивилизации как системы *до границ стран «золотого миллиарда»* с превращением остальных стран в «окружающую среду» как источника ресурсов и стока для загрязнений..

Противодействие росту энтропии

С позиций системного подхода и на основании рассмотренных свойств энтропии можно выделить следующие **общие направления борьбы с ростом энтропии**, которые подходят и для стран, и для регионов:

- уменьшение продукции энтропии и увеличение продукции негэнтропии в системе;
- уменьшение экспорта и увеличение импорта негэнтропии в систему;
- уменьшение импорта и увеличение экспорта энтропии из системы;
- объединение системы с другими системами;
- увеличение степени открытости системы;
- упрощение системы – уменьшение ее размеров и сложности;
- увеличение емкости внешней среды системы;
- улучшение управления системой.



Примеры борьбы с ростом энтропии

Направления борьбы с энтропией	Примеры
Уменьшение продукции энтропии и увеличение продукции негэнтропии в системе	Научно-технический прогресс, «экономика знаний», ресурсо- и энергосбережение, безотходное производство, развитие образования, культуры, медицины.
Уменьшение экспорта и увеличение импорта негэнтропии в систему	<p>Экономика стран «золотого миллиарда»:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ уменьшение экспорта природных ресурсов, предотвращение «утечки мозгов» и капиталов; ▪ вывоз природных ресурсов, финансовых средств, квалифицированной рабочей силы из развивающихся стран.
Уменьшение импорта и увеличение экспорта энтропии из системы	Сокращение вредных производств на привозных ресурсах и неконтролируемой миграции. Перевод вредных производств в развивающиеся страны .
Объединение системы с другими системами	Создание империй, захватнические войны, колониальная политика, монополии и ТНК, союзы.
Увеличение открытости системы	Глобализация, развитие Интернета и мобильной связи, ликвидация таможенных и информационных барьеров, выход в космос.
Упрощение системы – уменьшение ее размеров и сложности	Распад империй, реализация концепции «золотого миллиарда», войны, разделения в компаниях.
Увеличение емкости внешней среды системы	<p>В прошлом - территориальная экспансия, Великие географические открытия, колониальная система.</p> <p>В перспективе - освоение космического, подводного и подземного пространства, пустынь и гор.</p>
Улучшение управления системой	Сильное государство, стратегическое управление, цели устойчивого развития, развитие информационных технологий.

Условия устойчивого развития

Определим формальные условия устойчивого развития.

Пусть $M(t)$ - множество всех существующих материальных элементов (химические элементы, соединения, материалы, поля и т.д.) в момент времени t , причем

$$M(t) = R(t) \cup N(t) \cup P(t), \quad R(t) \cap N(t) \cap P(t) = \emptyset, \text{ где}$$

$R(t)$ - *множество полезных ресурсов (природного и искусственного происхождения);*

$N(t)$ - *множество нейтральных (не используемых в хозяйственной деятельности) элементов;*

$P(t)$ - *множество загрязнений.*

С развитием цивилизации данные множества постепенно изменяются: множества ресурсов $R(t)$ и загрязнений $P(t)$ расширяются, а множество $N(t)$ - сужается (бесполезные ранее вещества и поля становятся ценными ресурсами - природный газ, бокситы, электромагнитное поле и т.д.).

Для любого элемента $x \in M(t)$ определим:

$v_x(t)$ - *имеющийся объем в натуральном выражении;*

$e_x(t)$ - *эффективность (полезность).*

Считаем, что загрязнения имеют отрицательную эффективность, т.е.

$$e_x(t) > 0, \quad x \in R(t), \quad e_x(t) = 0, \quad x \in N(t), \quad e_x(t) < 0, \quad x \in P(t).$$

Определим текущее множество ресурсов как $R(t) = \bigcup_{i=1}^{n(t)} R_i(t)$, $\bigcap_{i=1}^{n(t)} R_i(t) = \emptyset$, где

$R_i(t)$ - множество взаимозамещающих ресурсов каждого i -го типа (например, дрова, уголь, нефть, газ, атомная энергия для энергетики), $n(t)$ - количество типов ресурсов.

Определим текущее множество загрязнений как $P(t) = \bigcup_{j=1}^{m(t)} P_j(t)$, $\bigcap_{j=1}^{m(t)} P_j(t) = \emptyset$, где

$P_j(t)$ - множество загрязнений каждого j -го типа, обладающих аналогичным негативным воздействием, $m(t)$ - количество типов загрязнений.

Условия устойчивого развития-2

Тогда **суммарная эффективность ресурсов** каждого i -го типа в душевом измерении

есть $R_i^*(t) = (\sum_{x \in R_i(t)} v_x(t) \cdot e_x(t)) / S(t)$, где $S(t)$ - численность населения,

а суммарная эффективность всех ресурсов - $R^*(t) = \sum_{i=1}^{n(t)} R_i^*(t)$.

Аналогично определяется **суммарная вредность загрязнений** каждого j -го типа в душевом измерении

$P_j^*(t) = -(\sum_{x \in P_j(t)} v_x(t) \cdot e_x(t)) / S(t)$ и суммарная вредность всех загрязнений $P^*(t) = \sum_{j=1}^{m(t)} P_j^*(t)$.

Суммарная эффективность ресурсов $R^*(t)$ не убывает с течением времени при следующих условиях:

- $n(t)$ не убывает - появляются качественно новые типы ресурсов;
- $|R_i(t)|$ не убывает для всех i - появляются новые ресурсы каждого типа (например, сланцевый газ);
- увеличиваются объем (запасы) и полезность (эффективность) существующих ресурсов.

Аналогичным образом определяются условия невозрастания $P^*(t)$ с течением времени

Сформулируем **необходимые (но не достаточные) условия устойчивого развития**: для любого t и всех $i = 1, n(t)$, $j = 1, m(t)$ справедливо:

$$R_i^*(t) \leq R_i^*(t+1), P_j^*(t) \geq P_j^*(t+1).$$

С течением времени суммарная полезность ресурсов каждого типа не убывает, а суммарная вредность загрязнений каждого типа не возрастает в душевом измерении (невозрастание энтропии системы) с учетом изменения состава, объемов и эффективности различных ресурсов и загрязнений.

Технологические аспекты

По Шредингеру, любая система существует только за счет извлечения из среды информации; человек не использует вещество и энергию как таковые - он использует их определенные полезные свойства, которые требуются для достижения определенных целей. Поскольку свойства вещества и энергии представляют собой некоторую информацию, то можно считать, что используются не вещество и энергия как таковые, а **содержащаяся в них информация**.

Например, требуется не вода вообще, а вода для питья, промышленных целей, орошения и т.д.

Материя и информация в некотором смысле взаимозаменяемы: эффективное структурирование материи (внесение дополнительной информации) позволяет снижать затраты этой материи, делать изделия более эффективными, компактными и менее ресурсоемкими. Недаром знаменитое уравнение Эйнштейна $E=mc^2$ связывает вещество (m), энергию (E) и информацию (c).

Например, достаточно сравнить канат из пеньки и нить из композитных материалов, процессор ЭВМ БЭСМ-2 и Intel Core, паровой котел и двигатель современного автомобиля.

Тем самым определяется **лидирующая роль науки** и новых технологий для реализации устойчивого и экологически безопасного развития: **их использование позволяет превращать ранее бесполезную материю и отходы производства в полезные ресурсы**.

Будущие технологии – это новые материалы (сверхпроводники, композиты), источники энергии (термоядерная, гравитационная), химические и биохимические реакции (искусственный фотосинтез, изменение генетического кода, био-нанорасщепление отходов), вычислительная техника (квантовые компьютеры) и т.д.

Потенциальная возможность бесконечного устойчивого развития: поскольку материя неисчерпаема, из нее можно получать все больше и больше информации, т.е. ресурсы не ограничены с точки зрения негэнтропии.

Экологические аспекты

Экологические проблемы являются одними из основных в проблематике устойчивого развития.

- если ранее основной целью любой общественной формации было создание максимального удобства для жизни человека, а **основной идеей был антропоцентризм** («все для человека, все для блага человека»), то в настоящее время главным становится сохранение биосферы как общего дома всего человечества;
- если раньше стремились не навредить биосфере, то теперь возникает вопрос, сможет ли цивилизация скомпенсировать обратное негативное влияние на нее потоков энтропии от деградировавшей биосферы.

Сложность экологических проблем связана с **многоплановой ролью природной среды для цивилизации**: она одновременно является средой обитания, источником ресурсов, производственной средой и полигоном для отходов.

В качестве метафоры можно представить себе проживание в комнате, которая одновременно является жильем, складом, мастерской и свалкой.

В экологической проблематике имеется **много противоречивых положений**, не учитывающих следующие факты:

- развитие системы-цивилизации (рост негэнтропии) обязательно сопровождается ростом энтропии в окружающей природной среде;
- **экологические цели (охрана природы) прямо противоположны экономическим** (интенсивная эксплуатация природных ресурсов в целях извлечения прибыли);
- многие исследователи справедливо критикуют концепцию устойчивого развития за то, что часто в ней скрывается основная причина глобальных проблем – бесконтрольная погоня за прибылью;
- при решении экологических проблем **воздействие производится только на природу** (мониторинг, охрана природы, ликвидация загрязнений и т.д.), а экономические и социальные отношения не рассматриваются.

Под ресурсами и загрязнениями более правильно рассматривать **не только материальные субстанции** (опосредованная форма энтропии), но и информацию в чистом виде. Тогда под «экологическими проблемами» цивилизации можно понимать также **загрязнение информационного пространства фейками и негативной информацией** при сокращении информации позитивной, относящейся к науке, культуре, религии, природе.

Экологические аспекты-2

При выполнении условий устойчивого развития получаем

$$|R(t)| \rightarrow |M(t)|, |N(t)| \rightarrow 0, |P(t)| \rightarrow 0,$$

т.е. циклы преобразования материи в техноценозах приобретают те же свойства, что и **циклы в природных экосистемах**, в которых отсутствуют отходы и бесполезная материя, а **все является полезными ресурсами** для множества трофических цепей.

Существующая разомкнутая и пагубная для окружающей среды цепочка

ресурсы → система → отходы

превращается в замкнутую схему, действующую в биогеоценозах:

ресурсы → система → отходы → первичные элементы → ресурсы.

В природе не существует безэнтропийных процессов, поэтому **не существует безотходных технологий и производств**. Но в любом случае отходов должно быть меньше, менее вредных, преобразуемых в ресурсы и удаляемых максимально далеко от полей высокой концентрации.

Так, актуальны принципы экологии замкнутого цикла 5R: reduce – уменьшить энерго- и материалоемкость; replacement – замена на возобновляемые ресурсы; recovery – использование переработанных отходов; recycling – рециркуляция отходов; reuse – многократное использование продукции.

Потенциальная возможность устойчивого развития подтверждается тем, что **природные экосистемы тратят до 40% своих энергоресурсов на решение собственных «экологических проблем»** (разложение продуктов метаболизма и погибших организмов), а даже наиболее развитые страны – не более 5%.

Поэтому **топливно-энергетический комплекс одновременно является:**

- основным потребителем природных ресурсов и основным (с учетом автотранспорта) источником загрязнений;
- основным инструментом решения существующих проблем на новой технологической базе, обеспечивающей получение дешевой и экологически чистой энергии.

Экономические аспекты

В современном обществе потребления **главным средством извлечения прибыли** для компаний является не уменьшение издержек на оплату труда как до 20 в., а увеличение доходов за счет роста продаж на основе кейнсианской модели. Ориентация на неограниченный рост, стимулирование спроса и удовлетворение индивидуализированных потребностей являются одновременно:

- основой научно-технического прогресса и увеличения благосостояния населения развитых стран;
- основной причиной роста энтропии (увеличение потребляемых ресурсов и производимых загрязнений).

Современная экономическая система **враждебна устойчивому развитию, поскольку ориентация на извлечение прибыли, неограниченное потребление и конкуренцию ведут к непрерывному росту как потребляемых природных ресурсов, так и производимых отходов.**

Необходимо **разумное ограничение конкуренции**: при конкуренции большинство компаний-соперников гибнет (рост энтропии), при сотрудничестве энтропия уменьшается (падение энтропии при объединении систем).

Переход к более прогрессивной модели производственных отношений – это **необходимое, но не достаточное условие** решения энтропийных проблем устойчивого развития.

Для обеспечения устойчивого развития и уменьшения роста энтропии возможны следующие варианты дальнейшего развития:

- **консервация мирового капитализма** с переходом на более экологичный путь развития с сохранением существующей нормы за счет повышения цен на продукцию (монопольных и/или включающих значительные экологические издержки), экономика услуг и эмоций, реализация концепции «золотого миллиарда» и т.д.;
- **конвергентная модель развития**, аналогичная китайской, где сочетаются элементы капитализма (рыночная экономика с частной собственностью) и социализма (государственное планирование, ориентация на благосостояние народа).

Экономические аспекты-2

1. В 80-е гг. XX в. сформировалось корпоративное **стратегическое управление** как реакция на кардинальный рост нестабильности (изменчивости и сложности) внешней среды. Его ключевые положения:

- поведение хозяйствующих субъектов определяется в основном вызовами внешней среды;
- будущее ограничено предсказуемо, а формирование стратегий – ограничено эффективно;
- процесс управления должен быть упреждающим, т.е. следует воздействовать на внешнюю среду;
- стратегические решения должны иметь возможность корректировки.

Т.к. стратегической целью государств и регионов является обеспечение их устойчивого развития, то стратегическое управление становится основным инструментом реализации стратегий устойчивого развития.

2. В стратегическом управлении широкое распространение получила **концепция стоимостного управления**, согласно которой главной задачей любой компании становится не текущий рост прибылей, а рост будущих доходов и максимизация стоимости данной компании.

Стоимость оценивается как сумма дисконтированных денежных потоков будущих периодов и рассматривается как наиболее эффективный критерий оценки деятельности компании - формализуемый, долгосрочный и информативный.

Применительно к регионам концепция стоимостного управления органично сочетается с концепцией устойчивого развития, с воспроизводственным подходом и позволяет с **экономической точки зрения обосновать важность развития социальной сферы и охраны окружающей среды.**

Если стремиться только к максимизации текущей прибыли, то в перспективе истощение природных ресурсов, загрязнение среды, ухудшение здоровья населения, нехватка квалифицированных кадров неминуемо уменьшат стоимость региональной социо-эколого-экономической системы.

Духовные аспекты

Сущность любой традиционной религии состоит в следовании высоким моральным принципам и в Любви – к Богу, к ближнему, к себе. Возможно, непреходящая сила мировых религий также связана с тем, что ни одна из существующих мировоззренческих систем не направлена *так явно именно на борьбу с энтропией* в человеке и в обществе как религия:

- ❖ высокие моральные принципы прямо противодействуют энтропии в виде зла, аморальности, хаоса и т.д.;
- ❖ проповедь любви полностью соответствует теореме Шеннона об объединении, поскольку любовь (дружба, сотрудничество) непосредственно уменьшает энтропию;
- ❖ учение о загробной жизни отрицает смерть как высшее проявление энтропии для каждого индивида.

Многие ограничения, накладываемые религией, могут показаться странными для невоцерковленного человека, но становятся очевидными при использовании энтропийного подхода. Так, проповедь сдержанности и смирения отражает тот факт, что сильные эмоции, даже положительные, нарушают гармонию и негативно влияют на организм. А вроде бы невинные недостатки, такие как праздность и излишества, хотя и не приносят видимого вреда, только увеличивают энтропию, поскольку не ведут к созданию каких-либо систем и уменьшают негэнтропию за счет потребления ресурсов.

Человек, созданный по образу и подобию Божию, является активным творцом всего на планете. Поэтому высшее предназначение Человека – это обеспечивать рост либо неубывание негэнтропии, препятствуя энтропийному загрязнению, в первую очередь, за счет *создания и обеспечения функционирования самых различных систем* (семья, дача, компания, научное направление, собрание сочинений и т.д.).

Аспекты управления

Результаты, полученные в системных науках, включая теорию систем и синергетику, относятся к процессам развития и самоорганизации сложных систем различной природы **и накладывают определенные ограничения** на возможности реализации целей устойчивого развития.

- В силу свойства **слабой структурированности** возможности формализованного описания, анализа, моделирования и прогнозирования развития таких систем принципиально ограничены, а их модели обычно содержат качественную, неопределенную, неоднозначную, многокритериальную и многоэкстремальную информацию.
- В таких системах не всякая поставленная цель развития и стратегия ее достижения реально осуществимы: **существенная нелинейность** сложных систем при огромном количестве входных параметров делает их поведение слабо прогнозируемым, причем всегда сохраняется возможность перехода в режим с обострением, когда выходные характеристики системы неограниченно растут за конечное время с возможным распадом системы.
- В траектории развития таких систем чередуются каналы развития, когда система практически неуправляема из-за малой чувствительности к внешним воздействиям, и **точки бифуркации**, в которых система сверхуправляема - крайне чувствительна к малым внешним возмущениям и случайным образом может перейти на одну из нескольких новых траекторий развития.
- В пространстве состояний сложных систем обычно имеются **аттракторы** – области устойчивого притяжения траекторий развития системы, и области готовности, отражающие возможности адаптации системы; если цели системы лежат вне таких областей, то их достижимость весьма проблематична.
- В сложных системах **сила положительных и отрицательных обратных** связей постоянно меняется вплоть до перехода положительных связей в отрицательные и наоборот.

Закон необходимого разнообразия Эшби

Улучшение управления системами является эффективным и наиболее доступным способом уменьшения системной энтропии за счет привлечения дополнительной - управляющей информации.

К сожалению, сложность социо-эколого-экономических систем любого уровня (от государств и до населенных пунктов), уже превысила допустимые пределы, устанавливаемые **законом необходимого разнообразия Эшби**, в соответствии с которым для успешного управления разнообразие субъекта управления должно быть не меньше разнообразия объекта управления (ОУ).

Следствием этого является ухудшение управления, рост количества нерешенных проблем, включая глобальные. А причина в том, что за короткий исторический период разнообразие объектов управления выросло колоссально, а **разнообразие субъекта во многом ограничено физиологическими возможностями мозга.**

Пусть

$H(Y)$ - разнообразие состояний ОУ;

$H(X)$ - разнообразие состояний субъекта управления;

$H(X|Y)$ неоднозначность управления относительно состояний ОУ (субъект также подвержен внешним воздействиям и не обладает полной информацией о состоянии ОУ и среды);

$H(Y|X)$ - реальная энтропия ОУ при управлении.

Тогда $H(Y|X) = H(Y) - H(X) + H(X|Y)$.

Пути повышения качества управления

Для **повышения качества управления**, т.е. уменьшения $H(Y|X)$, имеются следующие возможности:

- уменьшать сложность ОУ $H(Y)$;
- увеличивать разнообразие управления $H(X)$;
- уменьшать неоднозначность управления $H(X|Y)$ за счет сбора более полной информации о среде и ОУ.

Возможные решения:

- изменения объекта управления: **упрощение системы и унификация ее элементов (инклюзивный капитализм!)**, упорядочение системы, увеличение открытости системы, декомпозиция системы, организация допустимых систем и т.д.;
- изменения субъекта управления: децентрализация управления на **основе сетевых структур**, рефлексивное управление, планирование и стратегическое управление, переход от управляемого к направляемому развитию, **платформизация**, использование искусственного интеллекта и т.д.

Отсюда вытекает важность использования **математических методов и ИКТ**, которые позволяют увеличивать сложность (разнообразие) субъектов управления. Следует подчеркнуть особую роль искусственного интеллекта, «мягких вычислений», нечеткой математики.

При этом роль математических методов и ИКТ **так же двойка**, как и роль научно-технического прогресса в целом:

- позволяют увеличивать сложность (разнообразие) субъектов управления;
- именно бурное развитие ИТ (особенно Интернета) явилось одной из основных причин роста нестабильности мировой экономики из-за глобализации, кардинального увеличения уровней сложности и конкуренции.

Заключение

Проблемы устойчивого развития социо-эколого-экономических систем любого уровня целесообразно рассматривать в контексте предотвращения роста энтропии.

Слова Шредингера для живых систем можно отнести к произвольным системам:

«существенно в метаболизме то, что **организму удается освободиться от всей той энтропии**, которую он вынужден производить, пока жив».

Использование энтропийного подхода дает **четкие критерии при оценке решений** для социально-экономических систем любого уровня (от планетарной цивилизации и до муниципалитетов): хорошо все то, что уменьшает энтропию в обозримом будущем, плохо все то, что ее увеличивает.

Вследствие неисчерпаемости материи как источника негэнтропии, научно-технический прогресс и, в частности, развитие информационных технологий и топливно-энергетического комплекса, позволяют дать **положительный ответ на возможности устойчивого развития**. Их двойственная роль в возникновении и разрешении проблем устойчивого развития подтверждает известный факт, что любая проблема проявляется только тогда, когда возникают условия для ее решения.

Значительные ограничения для такого развития накладывают:

- существующая модель экономического развития с ее ориентацией на извлечение прибыли и неограниченный экономический рост, ведущий к деградации биосферы;
- специфические особенности сложных систем, уменьшающие возможности их анализа, прогнозирования и управления.