# Устойчивое развитие с позиции технологического императива

*С.А. Махов*

## *Введение*

Идее устойчивого развития скоро будет 20 лет. Несмотря на столь длительный промежуток времени, прошедший с момента доклада Гру Харлем Брундтланд "Наше общее будущее" [1], все еще нет общепринятого научного определения устойчивого развития: ученые различной специализации склонны понимать этот термин по-своему [2]. Одни ставят во главу угла обеспеченность ресурсами, другие – состояние окружающей среды, третьи – социальную справедливость, и т.п. Одним словом, спектр довольно широк, чему способствует нечеткость первоначального определения, носящего скорее операциональный, чем аксиоматический характер.

Между тем основная проблема, стоящая перед современным миром – выстраивание долговременной стратегии развития, не допускающей коллапса мировой системы на всем интервале прогнозирования. Для этой цели существенно определение спектра возможных путей развития. С этой точки, зрения важно выделить *параметры порядка* – те медленные переменные, под поведение которых будут подстраиваться остальные.

Одной из таких, более или менее успешных попыток, видимо, можно считать модель мировой динамики Дж. Форрестера [3]. В его модели основными параметрами были ресурсы и загрязнение окружающей среды. Причем вторая переменная, по сути, те же ресурсы, которые перестали быть доступны или просто уничтожены. В самом деле, важно не само по себе загрязнение, а те последствия, которые оно с собой несет: невозможность использования чистой воды, воздуха, земель, лесов, и т.п., то есть либо недоиспользование ресурсов, либо прямое их низведение (рост загрязнения означает уменьшение ресурсов). Таким образом, вместо двух параметров можно говорить об одном: доступные человечеству *ресурсы*. В этом смысле именование подобных моделей ресурсными вполне оправдано.

Следующий не менее (а, на самом деле, более) важный параметр – *численность населения*. Именно люди определяют потребности в ресурсах, задавая тем самым вектор развития всей системы в целом. Это отражает суть *демографического императива*, сформулированного С.П. Капицей. В соответствии с этим принципом рост народонаселения – основной двигатель истории [4, 5].

Представляется, что также необходимо учитывать и то, с помощью чего происходит материальное развитие человеческого общества – *технологии*. Человек вряд ли стал бы тем, кто он есть в настоящий момент, без техносферы – материального пространства цивилизации, служащей своеобразной прослойкой между ним и окружающей средой.

Итак, параметрами порядка на протяжении мировой истории (и ближайших столетий) можно считать численность населения, уровень технологий, ресурсы. Любая модель, претендующая на полное описание глобальных процессов, должна содержать все три переменные. Наша задача несколько скромнее. Мы рассмотрим лишь часть, относящуюся к проблеме ресурсообеспеченности человечества в условиях исчерпания ресурсов, с точки зрения развития технологий, не затрагивая демографии. Некоторым оправданием этому может служить представление о том, что в прошлом прирост населения всегда подстраивался под имеющийся уровень развития технологий [6, 7, 8]. Численность людей не может превысить пределы, задаваемые освоенной технологической нишей. И в этой связи представляется уместным говорить о *технологическом императиве*: основной механизм исторического движения – технологии. Кроме того, рост населения в настоящее время (по абсолютным показателям с 1989 года [9]) замедляется с тенденцией к стабилизации. В результате численность населения из глобальной динамической переменной все более превращается в локальный параметр, характеризующий местные условия.

## *Концептуальные основы моделирования*

Будем описывать мировую систему двумя переменными: ресурсы $R$ и уровень технологий $T$ (иногда для краткости будем говорить просто технологии).

*Ресурсы* – это все виды существующих и доступных (разведанных) ресурсов, как возобновляемых (например, чистый воздух, вода, лес, почвы), так и невозобновляемых (нефть, газ, металлы, минералы). Однако, прежде всего, мы будем учитывать невозобновляемые ресурсы, поскольку за последние несколько столетий скорость естественного восстановления ресурсов была достаточно мала по сравнению со скоростью их потребления.

В общем случае множество ресурсов $R$ носит векторный характер и представляет собой набор материальных и энергетических ресурсов. Такое векторное представление удобно при конструировании концептуальной или имитационной модели (и, отчасти, для получения некоторых оценок из реальных данных), однако при построении качественной математической модели, имеющей целью получение качественных же оценок, удобнее и надежнее скалярное представление (т.е. вектор ресурсов состоит всего из одной компоненты). Такое одномерное представление в принципе предполагает возможность единой для всех видов ресурсов единицы измерения, возможно, энергетической.

Мы будем считать, что такая возможность существует если не для всех, то, по крайней мере, для основных типов ресурсов, задающих и определяющих большинство важнейших производственных циклов в настоящем и ближайшем будущем. Иначе говоря, среди всего множества ресурсов предполагается наличие одного (или нескольких) ресурса, от наличия которого зависит производство продукции, что, по всей видимости, выполняется на протяжении известной нам истории (например, на индустриальной стадии развития таковыми являются энергоносители – уголь, нефть, газ). Тогда такой ресурс является параметром порядка в исследуемой системе и поэтому может быть основной динамической переменной в модели.

*Технологии* — это знания и средства производства, с помощью которых люди поддерживают собственное существование[1]. Таким образом, технологии – не только информация о том, как извлечь из природы различные ресурсы и блага, но и овеществленное представление этой информации, позволяющее непосредственно это делать. Капитал не выделяется в отдельную динамическую переменную: он представляет собой параметр $K$, зависящий от уровня технологий, и, в принципе, может играть роль количественной меры техносферы, если известна функциональная зависимость $K(T)$ (или в случае более подробной модели). Такое выделение технологического уровня, т.е. качества технологий, наряду с их количеством, подразумевает наличие структуры в пространстве технологий, в простейшем случае стратифицированной (иерархической) по степени сложности (например, по тому, сколько технологий необходимо для функционирования данной, или по длине производственной технологической цепочки). Такая иерархическая структура, по сути, представляет собой пирамиду. На рис.1 для удобства изображен простейший двумерный аналог такой пирамиды, т.е. обычный треугольник; вообще же пирамида криволинейна. Высота пирамиды есть уровень технологий, объем, с точностью до постоянного множителя, представляет собой капитал $K$ (таким образом, здесь $K \sim T^2$, в общем случае $K \sim T^n$). Таким образом, технологии в модели – прежде всего производящие технологии, т.е. создающие продукцию; хотя, вообще говоря, технологии бывают разные и могут быть классифицированы, например, по способам их применения или по типу решаемых задач.

---

[1] В реальности технологии связаны между собой, и одни существуют на основе других, поэтому под данный признак подпадают и материальные, и управляющие технологии [10]. Но нас, в первую очередь, интересуют технологии материальные (или иначе физические), поскольку они имеют дело с физическим пространством, а потому объективны и обладают возможностью измерения. Управляющие же (или иначе гуманитарные) технологии действуют в пространстве информационных объектов и, следовательно, носят субъективный характер (поэтому прямое их измерение довольно затруднительно, если вообще возможно). Основное свойство данных видов технологий заключается в том, что они должны быть согласованы между собой, то есть, техносфера устроена так, что на каждую физическую технологию приходится соответствующая ей гуманитарная. В противном случае происходит рассогласование техносферы и инфосферы, что приводит к кризису социосистемы, который, как и всякий кризис, не может длиться слишком долго и рано или поздно разрешится либо созданием согласовывающих технологий, либо забыванием несогласованных. Поэтому предполагается, что гуманитарные технологии согласованы с физическими, и развитие одного вида технологий означает соответствующее развитие и другого вида.

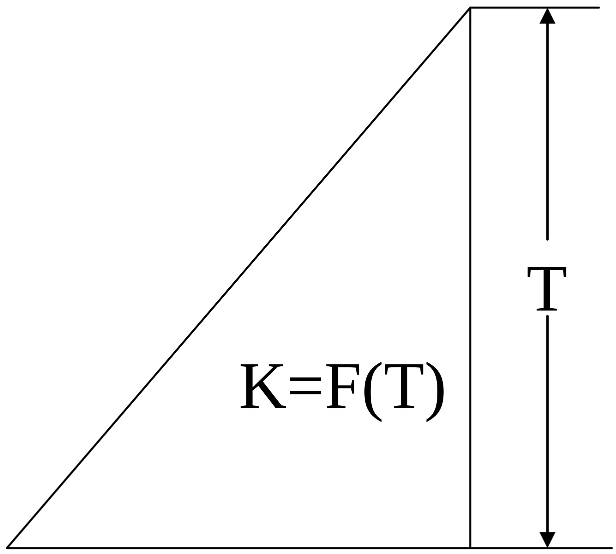


Рис.1. Иерархическая структура пространства технологий.

Модель взаимодействия между указанными величинами принимается такой: население *N* создает технологии *T*, технологии актуализируют (т.е. выделяют) ресурсы *R* из окружающей вселенной *U*, тем самым, повышая обобщенную продуктивность мировой социально-экономической системы, что ведет к росту населения.

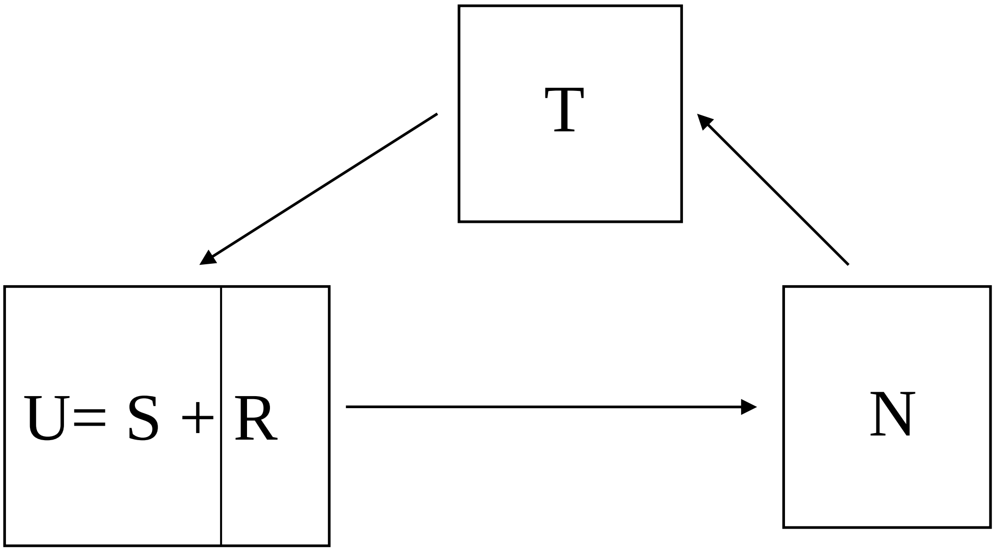


Рис.2. Схема взаимодействия между населением *N*, технологиями *T* и окружающей средой *U*, состоящей из ресурсов *R* и остального пространства *S*.

Таким образом, ресурсы появляются в результате применения оператора технологий на пространстве окружающей среды. Точнее говоря, *R* – ограничение оператора *T* на пространстве *U*, поскольку естественно считать ресурсы частью окружающей среды. Результат применения оператора – пара (*V*, *Q*), в которой первая буква означает продукт (множество благ), а вторая – отходы (множество веществ и видов энергии), возвращающиеся в окружающую среду.

При этом необходимо различать "вредные" и "безвредные" отходы: первые характеризуются тем, что уменьшают пространство ресурсов (в общем случае уменьшают значения по каким-то компонентам). Такие отходы естественно назвать загрязнениями (некоторые загрязнения быстро разлагаются и поглощаются, но нас, в первую очередь, интересуют стойкие загрязнения с достаточно большим временем разложения). Безвредные же отходы попадают в остальную окружающую среду $S$, так что $U = S + Z + R$. В нашей модели загрязнения не выделяются в отдельную переменную $Z$, а являются частью $S$ (рис.2), влияние же загрязнений в качестве вредных отходов на ресурсы локально-дифференциальное (в качестве темпа сокращения ресурсов). Также отметим, что на сегодняшний момент количество материи и энергии, используемых человечеством в качестве ресурсов всё еще на несколько (может быть, даже десятков) порядков меньше того количества, что находится в окружающей среде[1], т.е. R << S. Поэтому можно не рассматривать $S$ в качестве динамической переменной (необходимо, однако, учитывать ее конечность при получении и интерпретации бесконечных решений).

Заметим, что изложенная схема асимметрична: технологии играют роль ведущей, а численность населения – ведомой переменной, ресурсы выступают в качестве передатчика. То есть изменение одного только уровня технологий вызывает соответствующее изменение и других параметров, в то время как, скажем, уменьшение ресурсов может привести к разным вариантам – либо падение уровня технологий и численности населения, либо возврат на прежний уровень за счет актуализации новых ресурсов. В этой связи проблема наличия ресурсов, необходимых для развития мировой системы, в изложенной схеме представляется наиболее интересной. Поскольку в прошлом численность населения подстраивалась под уровень развития технологий и количество имеющихся ресурсов, представляется вполне допустимым при рассмотрении вопроса обеспеченности ресурсами отказаться от переменной "население" и иметь дело только технологиями $T$ и ресурсами $R$, предполагая $N \sim T$.

В схеме все три величины ведут себя согласованно и в среднем должны меняться по аналогичным качественным законам. Известны данные о росте населения Земли. В течение, по крайней мере, двух последних тысячелетий численность населения росла по гиперболическому закону (рис.3), то есть для этой переменной наблюдалась *масштабная инвариантность* и отсутствие характерных значений. Будем считать, что и для двух других переменных имеет место то же самое. Это означает, что при написании динамических уравнений все зависимости потоков скоростей изменения основных переменных от них самих должны носить *степенной* характер, т.е. иметь вид $R^xT^y$. Каждое такое произведение в правой части соответствующего дифференциального уравнения описывает действие одного фактора. Факторы считаются независимыми, поэтому если их несколько, они складываются или вычитаются.

[1] Можно сказать, что характерные значения энергии, используемой человечеством, много меньше энергии, запасенной нашей планетой.

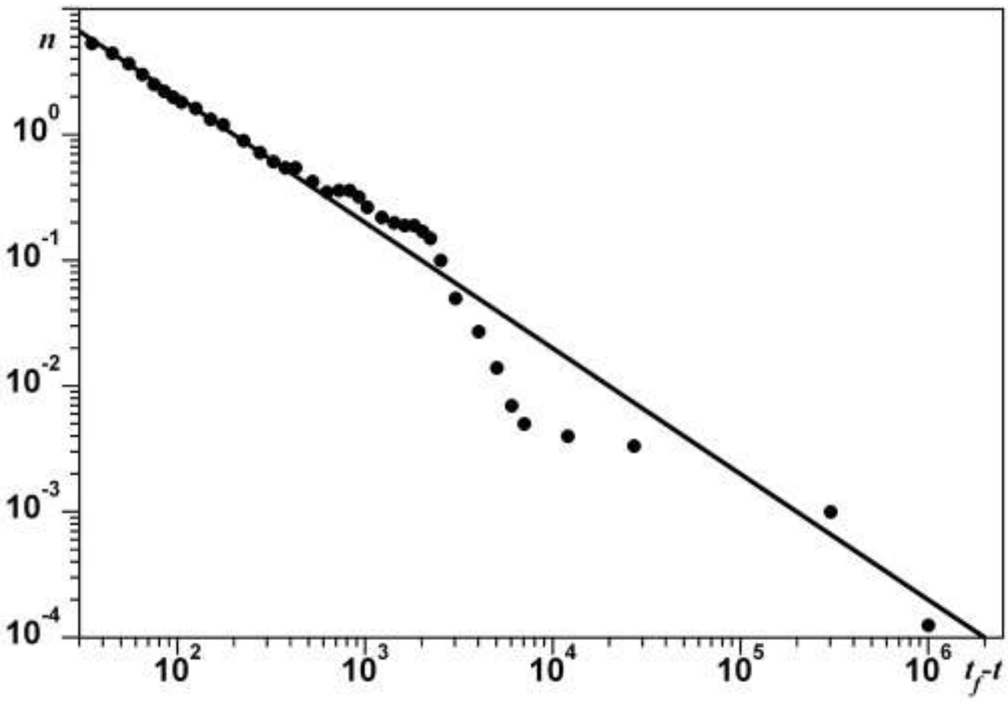


Рис.3. Гиперболический рост численности населения Земли в обратном отсчете времени. По оси абсцисс отложены годы, по оси ординат – млрд. чел. График представлен в двойном логарифмическом масштабе. Момент обострения (ухода численности населения на бесконечность) $t_f = 2025$г. Источник: [11].

## *Модель*

Наша модель описывает индустриальную фазу и переход к следующей (постиндустриальной) фазе развития мира. Сначала рассмотрим индустриальную фазу, которая в чистом виде длилась примерно с конца 18 – начала 19 века и до 1960-70-х г.г. (такое рассмотрение даст оценки на ряд параметров модели, сохраняющихся и в следующую фазу).

Выделялись следующие факторы: 1) добыча ресурсов $D$, 2) загрязнение $Z_0 \sim D$, 3) восстановление и открытие новых ресурсов $P$, 4) рост технологий $T_+$, 5) износ технологий $T_-$. Естественное восполнение возобновляемых ресурсов не учитывается ввиду малости данного эффекта по сравнению с потреблением ресурсов. В соответствии со сделанным выше замечанием относительно масштабной инвариантности и степенных зависимостей от основных переменных имеем следующую систему уравнений:

$$\frac{dR}{dt} = -D - Z_0 + P = -D(1+\varsigma) + P = -\lambda T^b (1+\varsigma) + \nu R^g T^h, \qquad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = T_+ - T_- = \sigma R^c T^d - \mu R^e T^f . \qquad (2)$$

где $D = D(T) = \lambda T^b$ – добыча ресурсов в единицу времени, поскольку при наличии больших запасов ресурсов нет ограничений на добычу, связанных с их нехваткой, всё определяется технологическими возможностями добывающего сектора экономики, что выполнялось на индустриальной фазе; $\zeta$ – доля вредных отходов в результате переработки добытых ресурсов в продукцию, будем считать ее постоянной: $\zeta = \text{const}$, тогда множитель $1+\zeta$ можно включить в коэффициент $\lambda$; Износ технологий считаем экспоненциальным: $e = 0$, $f = 1$.

Положительный член $P \sim R^g T^h$ в уравнении для ресурсов означает, что имеется поток ресурсов из окружающей среды. Такой поток отвечает за: 1) открытие новых месторождений имеющегося вида ресурса, 2) появление нового вида ресурса, 3) восстановление ресурсов из пространства загрязнений, т.е. очистка. Таким образом, один член описывает за два разных процесса (очистка загрязнений и открытие новых ресурсов), поскольку в нашей модели загрязнения не выделены в отдельную переменную (различие между указанными процессами можно попытаться провести на уровне показателей $g$ и $h$). Строго говоря, технологии, фигурирующие здесь, особые и развиваются они по-своему, поэтому для них также нужно писать уравнение, аналогичное (2), и не вполне корректно сразу писать зависимость $P$ от *всех* технологий $T$. Но если предположить, что сами такие технологии $T_2$ строятся на базе уже имеющихся производящих (ибо технологическое производство сложно и все в нем взаимосвязано), то можно считать технологии $T_2$ функцией всех технологий $T$: $T_2 = f(T) \sim T^y$.

Восстановление ресурсов из отходов возможно преимущественно на основании имеющихся ресурсов, поскольку проще очистить не до конца загрязненный и истощенный ресурс (пустыни практически невозможно превратить в плодородные земли – стоимость таких операций слишком высока), поэтому $g > 0$. Так как у восстановления ресурсов есть предел, связанный с исчерпанием пространства загрязнений $Z$ (что означает, вообще говоря, $P \sim RZ \sim R(R^*–R)$, где $R^*$ – предельное значение количества ресурсов, про которое можно сказать лишь то, что оно как-то зависит от размеров Земли, поэтому такой вид мы использовать не будем), то оно не может происходить все более возрастающими темпами при росте запасов ресурсов и должно носить характер все меньшей отдачи эффективности, то есть функция $P(R)$ должна быть выпуклой, поэтому $g < 1$.

Что касается зависимости восстановления ресурсов от технологий, то трудно сказать, будет ли она носить выпуклый или вогнутый характер. Так, с одной стороны, для восстановления одних типов ресурсов используются другие, которых в данный момент много, например, энергоресурсов, поэтому невозможно беспредельно восстанавливать загрязненные ресурсы, ибо это становится слишком дорого. С другой стороны, развитие технологий может снизить цену ресурсовосстановления (при этом появятся издержки на содержание таких технологий). Поэтому будем считать $h < b$, исходя из предположения, что восстановление ресурсов не сможет превзойти их добычу.

При открытии новых ресурсов (например, при использовании новых видов энергии и т.п.) зависимости от ресурсов нет: считается, что открытие новых видов ресурсов происходит, прежде всего, за счет накопленных знаний и необходимого для этого капитала: $P \sim T^h$. Что касается показателя $h$, то будем считать, что открытие и актуализация нового ресурса зависит не только от технологий, но и от капитала, который аккумулируется в технологической структуре тем больше, чем выше достигнутый технологический уровень. Это означает, что $h > 1$. Если учесть накопленные человечеством ресурсы за всю историю, то в прошлом в среднем было $h > b$, хотя и ненамного, принимая во внимание периодически возникающую нехватку ресурсов. Следовательно, мы едва ли сильно погрешим против истины, если будем считать $h < 2b$. Таким образом, можно считать, что при $g > 0$ и $h < b$ имеет место преобладание восстановления ресурсов, а при $g = 0$ и $h > b$ – преобладание открытия новых ресурсов.

Для понимания того, откуда берутся показатели в уравнении (2), введем определение валового мирового продукта (ВМП), получаемого из добытых ресурсов:

$$V = k(R,T) \cdot D = k(R,T)\lambda T^b, \qquad (3)$$

$k(R, T)$ – множитель производства, показывающий, сколько продукта можно получить из единицы добытого ресурса с учетом затрат на добычу. На индустриальной фазе считается $k = \text{const}$, поскольку на основании известных данных ВМП и потребление энергии (следовательно, и добыча ресурсов) росли в одинаковом режиме (рис.4).

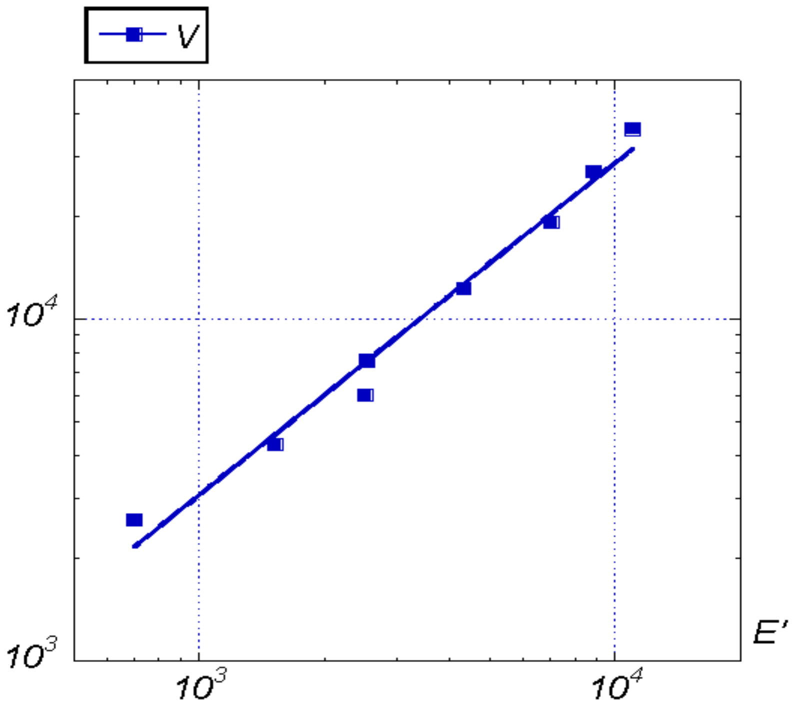


Рис.4. Зависимость мирового ВВП (млрд. долл. в ценах 2000 г.) от потребления первичных источников энергии (млн. тонн условного топлива). Точки графика соответствуют (последовательно слева направо) 1900, 1920, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 годам. График приведен в двойном логарифмическом масштабе. Наклон прямой = 0.97±0.05. Источники: [12, 13].

Такой режим возможен при наличии большого количества ресурсов (а также, когда их добыча компенсируется открытием новых месторождений), в условиях же их недостатка ВМП должен уменьшиться. Будем считать, что с уменьшением запаса наличных ресурсов растет цена их добычи, поэтому $k$ зависит от ресурсов: $k \sim R^a$ и, следовательно, $V \sim R^a$. Понятно, что показатель $a$ должен быть меньше 1, чтобы изменение $R$ слабо влияло на $V$, и была справедлива ситуация, представленная на рис.4.

Далее, примем, что технологии растут за счет вложений, каковые естественно описывать долей от мирового продукта $V$, которую будем считать постоянной. Зависимость скорости создания технологий от вложений должна, по всей видимости, носить выпуклый характер (т.е. с ростом технологий на то же увеличение технологического уровня требуется все больше средств). Согласно нашей общей методологии считаем, что зависимость степенная: $T_+ \sim V^m$, $m < 1$. Далее, создание технологий осуществляется на базе уже имеющихся, поэтому логично предположить, что рост технологий зависит также и от $T$, причем зависимость также степенная: $T_+ \sim T^q$. Таким образом, возвращаясь к (2), имеем: $c = am < 1$, $d = bm + q$.

## *Оценка некоторых показателей*

Для оценки ряда показателей привлечем следующие соображения, основывающиеся на косвенных данных. Как упоминалось, на индустриальной фазе численность населения пропорциональна уровню технологий: $N \sim T$. Это означает, что рост населения определяется ростом уровня технологий, поскольку те задают размер технологической ниши (т.е. какое количество людей может выжить при данном уровне развития технологий). Также известно, что потребление энергии (следовательно, косвенно и добыча ресурсов) в течение, по крайней мере, последних ста с небольшим лет росло степенным образом с ростом $N$, причем степень примерно 2 (рис.5). Таким образом, для показателя $b$ имеем оценку: $b \approx 2$.

Индустриальная фаза развития мира, по всей видимости, завершилась к началу 1970-х г.г., и ряд стран начали переход на следующую фазу развития, пока не имеющую общепринятого названия и поэтому зачастую именующейся просто постиндустриальной[1]. Основаниями для такого вывода служат следующие факты.

1. Изменение гиперболического закона роста населения Земли. С начала 60-х годов XX века темп прироста населения мира начал снижаться (а начиная с 1990 года снижается и абсолютный ежегодный прирост населения).

2. Экспоненциальный рост высоких технологий, в частности, мощность (интеграция, число транзисторов на процессоре) вычислительных устройств – так называемый закон Мура [16, 17] (рис. 6).

---

[1] Помимо наиболее часто использующегося термина "постиндустриальное общество" в научной и околонаучной литературе также встречаются слова "постэкономическое общество" [14], "информационное общество" [15], "когнитивная фаза развития" [10].

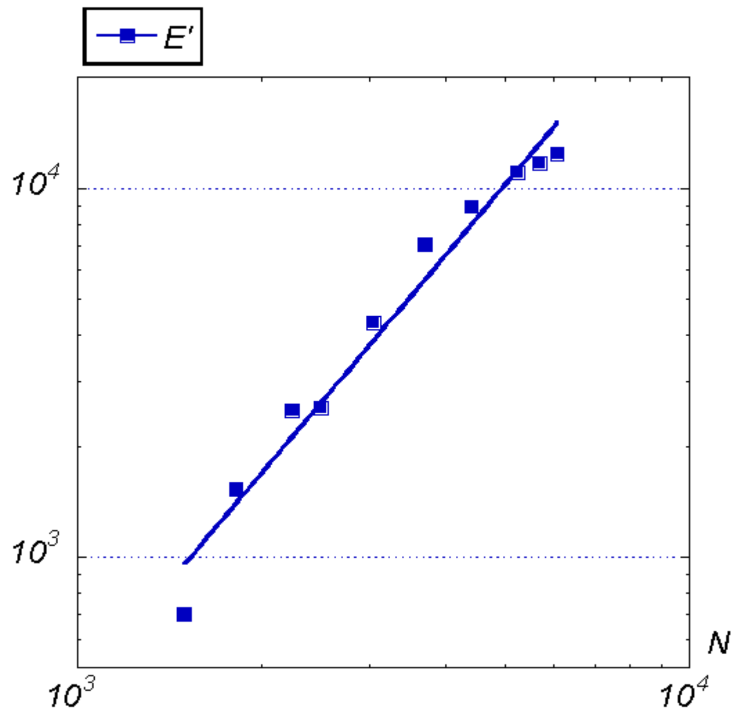


Рис.5. Зависимость потребления первичных источников энергии (млн. т.у.т.) от численности населения (млн. чел.) за 1900-2000 г.г. График приведен в двойном логарифмическом масштабе. Наклон прямой 1.97±0.07. Источники: [10, 11].

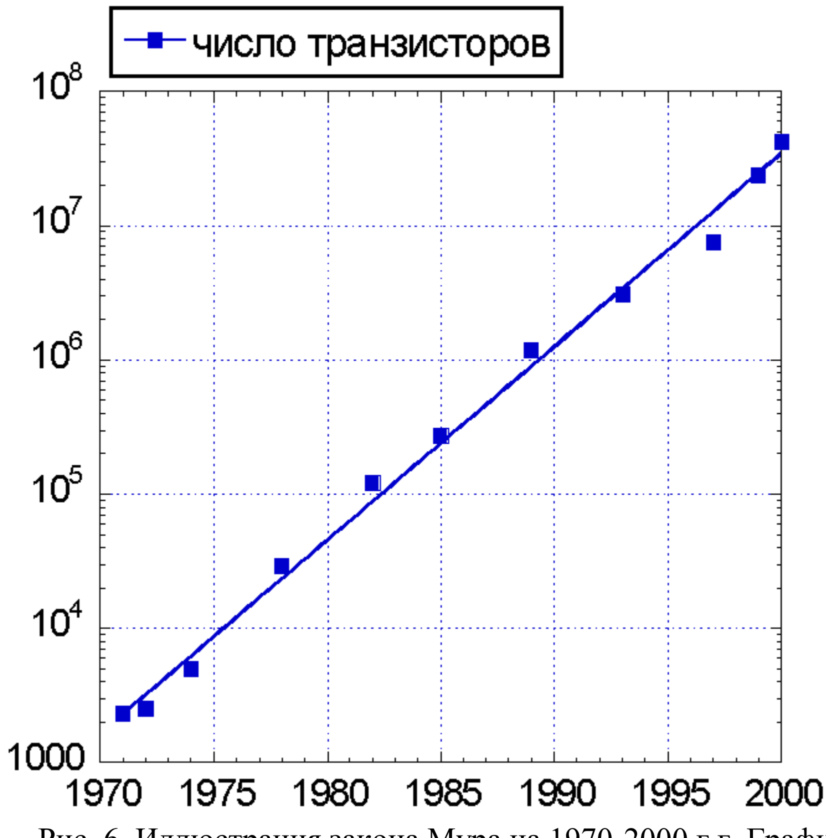


Рис. 6. Иллюстрация закона Мура на 1970-2000 г.г. График представлен в логарифмическом масштабе. Удвоение числа транзисторов происходит примерно каждые 25±1 месяцев. Источник: [15].

На основании первого факта мы будем считать, что численность населения стабилизируется и в пределе выходит на постоянное значение (помимо всего прочего это означает, что установится демографическое равновесие между традиционной и индустриальной фазами, которые характеризуются высокой и низкой рождаемостью соответственно).

Второй факт означает, что в уравнении (2) степень $d$ примерно равна 1 (поскольку обеспечивающие максимальную прибыль информационные технологии не испытывают дефицита ресурсов, то для этой области можно считать $R = \text{const}$). Иначе говоря, то, что справедливо для ИТ-области, мы перенесем на остальные технологии, а закон их развития (5) с $d = 1$ будем считать справедливым и на постиндустриальной фазе развития.

Далее, считается, что уравнение (1) остается в силе и на постиндустриальной фазе (т.е. потребление ресурсов определяется непосредственно достигнутым технологическим уровнем).

Помимо основных переменных введем понятие об уровне жизни $L$, который (с точностью до постоянного множителя) определим как часть продукта, направляемого на потребление, приходящегося на душу населения (на индустриальной стадии, на постиндустриальной стадии будем считать выражение для $L$ инвариантом):

$$L \sim \frac{V}{N} \sim \frac{V}{T} \sim R^a T^{b-1}. \tag{4}$$

Уровень жизни нужен, чтобы формализовать понятие устойчивого развития. *Будем говорить, что развитие моделируемой системы устойчивое, если в ходе ее эволюции при* $t \to \infty$ *уровень жизни не убывает.*

Иначе говоря, *устойчивое развитие – это такой асимптотический режим развития системы (1), (2), (4), в котором* $\frac{dL}{dt} \geq 0$ (*т.е. выход на константу возможен "снизу", а не "сверху"*). В связи с этим для целей исследования возможности устойчивого развития важно лишь качественное поведение исследуемой системы, абсолютные значения переменных не имеют значения и можно с легкостью менять шкалу измерения для $t$, $R$ и $T$. Поэтому за счет линейной замены по всем трем переменным можно избавиться от трех коэффициентов, положив $\lambda = 1$, $\sigma = 1$, $\mu = 1$ и исследовать уже следующую систему:

$$\frac{dR}{dt} = -T^b + \nu R^g T^h, \tag{5}$$

$$\frac{dT}{dt} = R^c T^d - T. \tag{6}$$

Здесь необязательно $d = 1$, таким образом, это система общего вида. Был проведен качественный анализ данной системы. Наряду с тривиальным аттрактором ($T^* = 0$, $R^* = 0$) имеется нетривиальное положение равновесия. Возможные типы показаны на рис.7.

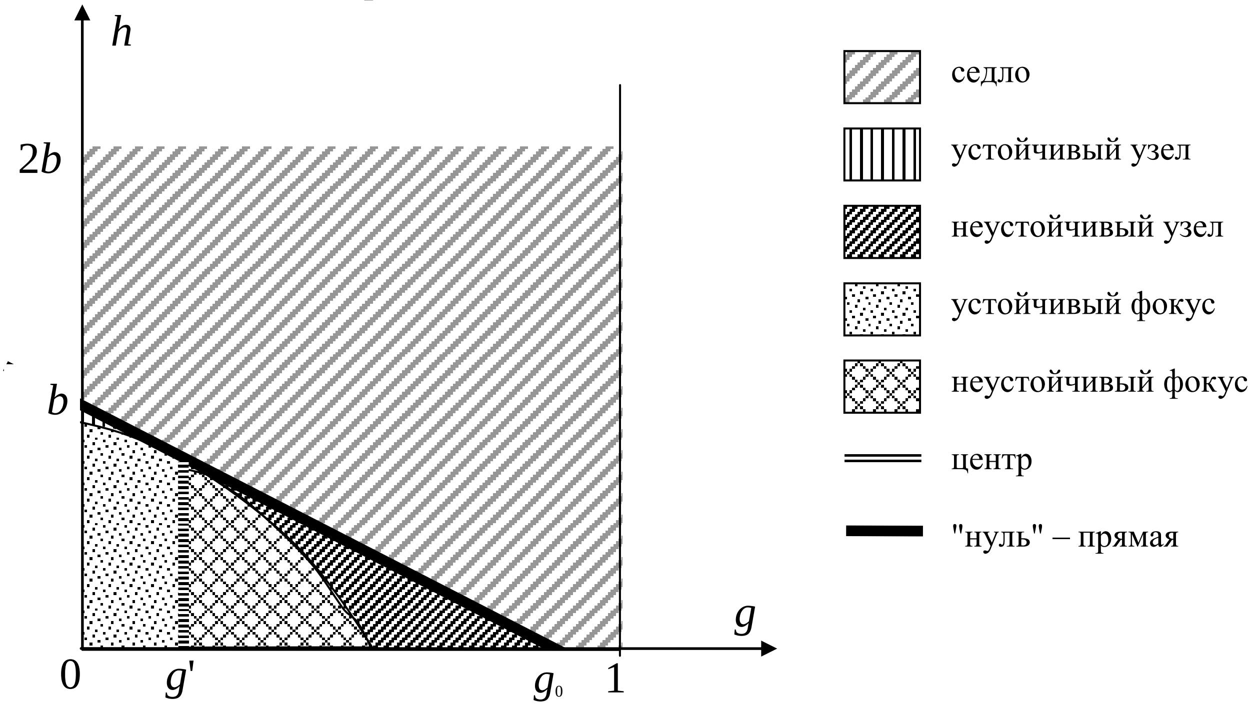


Рис.7. Типы положения равновесия в зависимости от значений параметров $g$, $h$.

В случае седла и неустойчивых узла или фокуса в зависимости от начальных данных будет либо падение в ноль (рис.8), либо неограниченный рост обеих переменных (рис.9).

Первый вариант отражает очевидный факт, состоящий в том, что без ресурсов современное человечество прожить не сможет, а потребление ресурсов в таких масштабах, в каких происходит сейчас, приведет к их полному исчерпанию, который повлечет за собой технологический упадок и (возможно, частичный) возврат к аграрной фазе развития. Такое развитие, очевидно, не является устойчивым.

Неограниченное решение содержательно означает либо отодвигание проблемы ресурсов в неопределенное будущее, например, за счет космической экспансии, либо выход за рамки модели, в силу неучета ограниченности Земли (выход или за пределы планеты, или за пределы модели).

В случае устойчивого узла или фокуса имеет место выход на константу. В зависимости от начальных данных такой выход будет более или менее плавным с возможным падением уровня жизни (рис.10, 11).

В случае центра имеют место колебания вокруг положения равновесия.

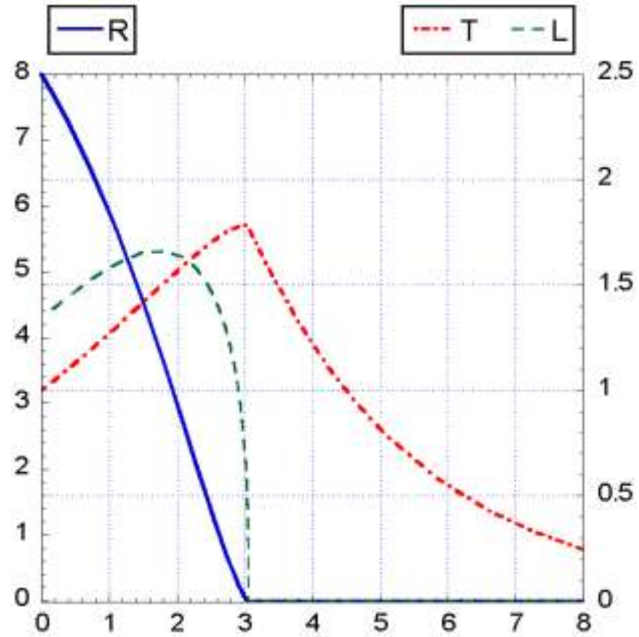


Рис. 8. Результаты расчетов для модели. Показана динамика основных переменных: $R$ – ресурсы, $T$ – технологии, $L$ – уровень жизни. По оси абсцисс – условное время. Переменные показаны в двух масштабах: шкала для ресурсов слева от самого графика, шкала для технологий и уровня жизни справа. После роста сначала падает уровень жизни, а вслед за ним и уровень технологий. После исчерпания ресурсов технологии по экспоненте убывают до нуля.

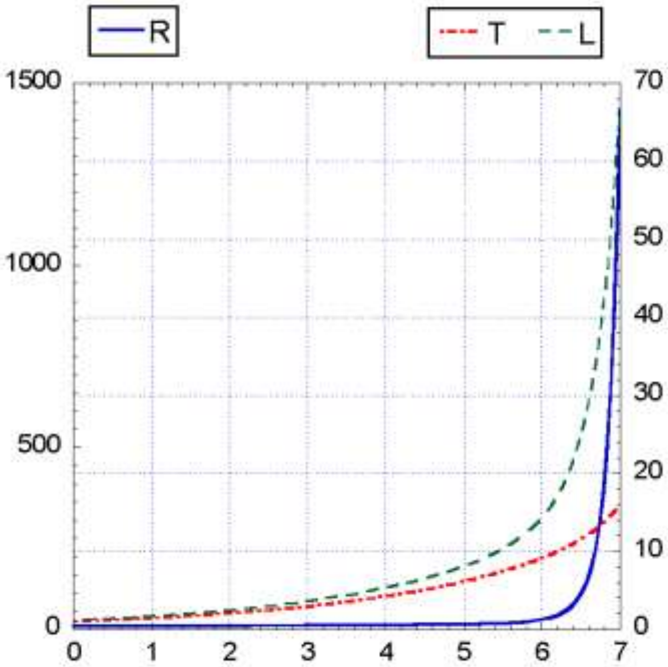


Рис.9. Результаты вычислений для модели в случае седла. Неограниченный рост технологий и ресурсов приводит к неограниченному росту уровня жизни.

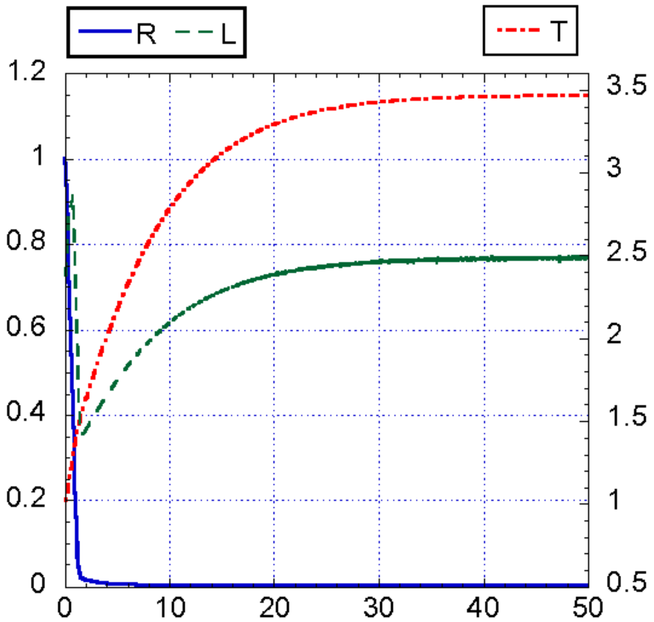


Рис.10. Результаты вычислений для модели в случае узла. После некоторого довольно резкого падения уровень жизни медленно растет вслед за технологиями, выходя на константу. Ресурсы сначала резко падают, затем поддерживаются на низком, но ненулевом уровне.

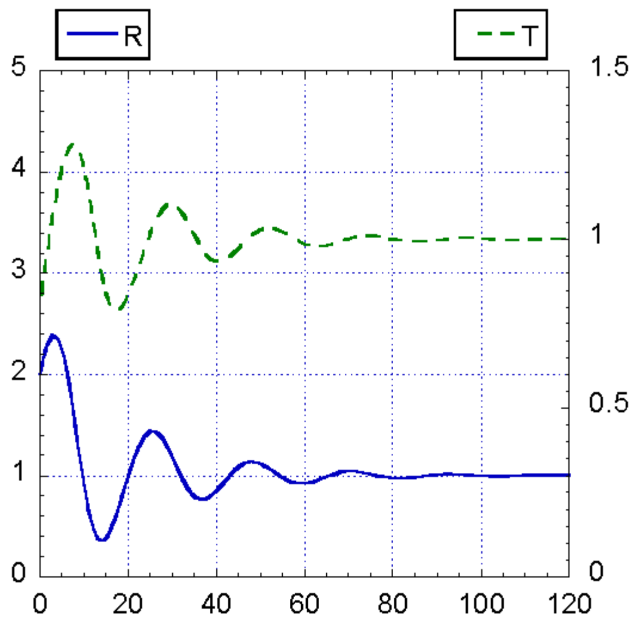


Рис.11. Результаты вычислений для модели в случае фокуса. Ресурсы и технологии колеблются с выходом на стационар.

В том случае, когда параметры $g$, $h$ лежат на прямой $am(b–h) = g(1–d)$, условно названной на рис.9 "нуль" (связано это с тем, что на этом множестве равно нулю одно из собственных значений соответствующего оператора правой части системы (11), (12), линеаризованной вблизи положения равновесия), система алгебраических уравнений $\frac{dR}{dt}=0$, $\frac{dT}{dt}=0$ не имеет единственного нетривиального решения. Возможно два варианта: либо решений бесконечно много при выполнении $\nu=1$, либо не существует вовсе в противном случае.

С точки зрения динамики системы имеем следующее:

1) при $\nu \neq 1$ наблюдается либо неограниченный рост всех переменных (если начальные значения ($R_0$, $T_0$) не находятся в области притяжения нулевого аттрактора), либо падение в ноль (в противном случае);
2) при $\nu = 1$ в случае $g < g'$ имеется множество устойчивых стационарных решений – кривая $R^*(T) = T^{\frac{1-d}{am}}$ (совпадающая с обеими главными изоклинами системы) на фазовой плоскости ($T$, $R$); в случае $g > g'$ устойчивых решений нет и наблюдается либо неограниченный рост, либо падение в ноль.

Формально под определение устойчивого развития подпадают динамика системы, представленная и на рис.9, и на рис.10.

Теперь рассмотрим важный частный случай системы (5), (6), когда $d = 1$: уравнение для технологий линейно по самим технологиям. Картинка типов положений равновесия выродится (рис.12): $g'$ станет равным нулю, и исчезнут области, отвечающие устойчивому узлу и фокусу. Это означает, что в данном случае системная динамика неустойчива: модельная система либо неограниченно развивается, либо коллапсирует до нуля.

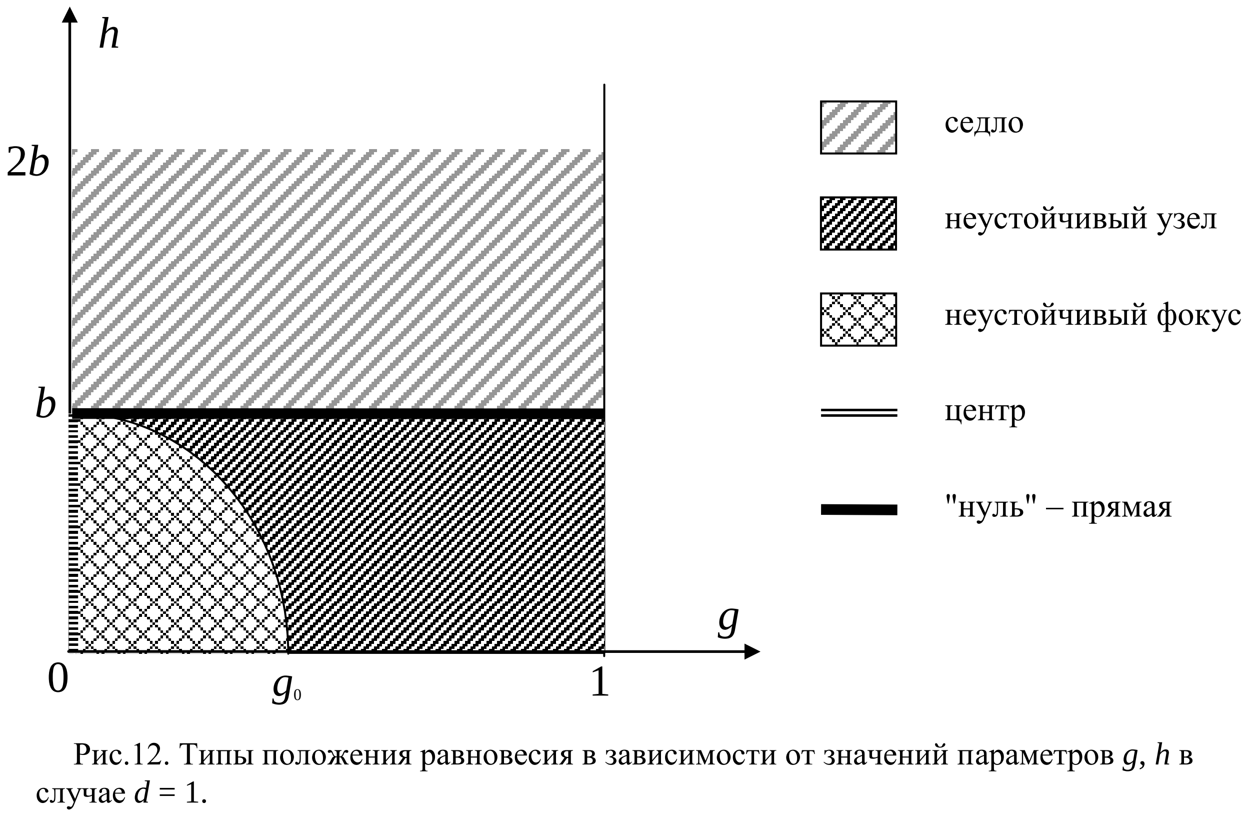


Рис.12. Типы положения равновесия в зависимости от значений параметров $g$, $h$ в случае $d = 1$.

Чтобы стало возможным существование устойчивого стационара как на рис.10, необходимо выполнение неравенства $d < f$ (см. уравнение (2)), т.е. чтобы скорость генерации технологий зависела от самих технологий меньше, чем скорость их износа. Такое возможно, например, если с ростом уровня технологий затраты на их поддержание увеличиваются тем скорее, чем выше достигнутый технологический уровень. В этом случае износ технологий уже не экспоненциальный, и будет иметь место $f > 1$.

## *Модель ресурсосбережения и очистки загрязнений*

Теперь обсудим вопрос достижимости УР (особенно это касается случая неустойчивых типов положения равновесия), точнее, какими способами можно на нее повлиять. Нетрудно понять, что достижение УР определяется расположением точки ($T$, $R$) на фазовой плоскости системы, соответствующей ее состоянию, в зоне притяжения аттрактора, соответствующего УР (как указывалось выше, это либо устойчивый стационар, либо бесконечная точка). Влиять на взаимное расположение зон притяжения и точки ($T$, $R$) можно изменением параметров моделируемой системы, либо самой системы. Остановимся на этом подробнее.

Итак, чтобы повлиять на достижение УР, нужно:

1. менять начальные значения основных переменных;
2. менять коэффициенты в уравнениях;
3. менять степени в уравнениях;
4. менять сами уравнения.

Изменение начальных значений ресурсов и технологий может означать их уточнение и определение погрешности измерения, так что сильно повлиять на достижимость УР невозможно и 1 пункт многого не даст. В системе (5)–(6) коэффициент всего один – $\nu$, отвечающий за скорость восстановления и открытия новых ресурсов. Ясно, что чем он выше, тем больше вероятность у системы оказаться в зоне притяжения УР. Однако, что делать, если $\nu << 1$? Тогда придется использовать пункты 3 и 4. Изменение степеней и изменение уравнений одинаково требуют введения дополнительных предположений и идей. Рассуждая логически, если нельзя увеличить темп восстановления и открытия новых ресурсов, значит, нужно уменьшить их расход (т.е. добычу), причем по возможности так, чтобы это не повлияло на ВМП. Понятно, что речь идет о *ресурсосберегающих* технологиях.

Исходя из общей схемы, ресурсосбережение есть снижение отходов производства/потребления (в частности, вторичная переработка уже отработанных материалов), иными словами, повышение КПД производства, т.е. коэффициента $k$, который можно записать в виде $k_R(R)k_T(T)$. Также снижение общих отходов производства (и, вообще, деятельности социосистемы) означает снижение и вредных отходов, т.е. загрязнений. Следовательно, нужно учесть зависимость $\zeta(T)$. Будем предполагать, что ресурсосбережение происходит таким образом, что продукт остается тем же, а расход ресурсов при этом уменьшается, т.е. $D = \dfrac{V}{k} \sim \dfrac{T^b}{k_T(T)}$ и тогда вместо уравнения (5) имеем:

$$\frac{dR}{dt} = -\lambda T^b \frac{1+\varsigma(T)}{k_T(T)} = -\lambda T^b C(T), \qquad (7)$$

где $C(T)$ – множитель, отвечающий за ресурсосбережение и снижение отходов. Понижать его в нашей модели возможно лишь за счет развития технологий (т.е. увеличения технологического уровня): $C \sim T^{-r}$, следовательно, окончательно имеем:

$$\frac{dR}{dt} = -\lambda T^b C(T) = -\tilde{\lambda} T^{b-r}, \qquad (7')$$

Легко видеть, что в случае $b > r$ качественное поведение системы (7'), (4), (6) ничем не отличается от системы (4)–(6). Произойдет лишь сдвиг динамики основных переменных по времени (рис.13).

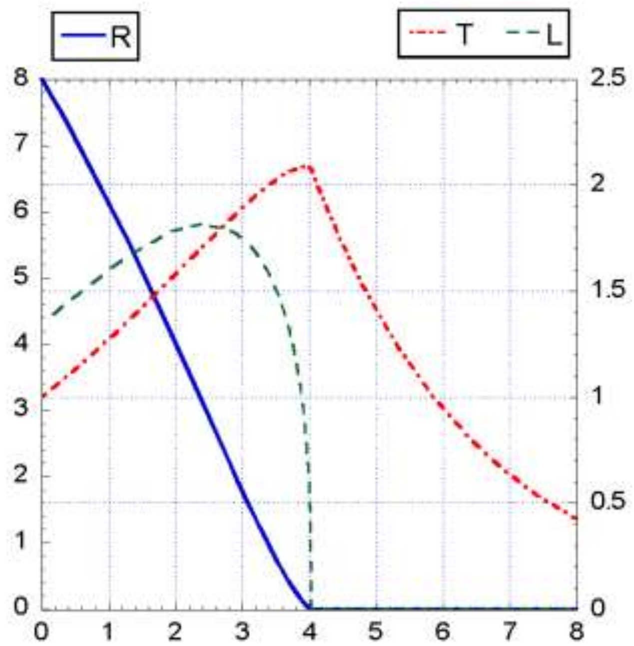


Рис. 13. Результаты по модели ресурсосбережения (4), (6), (7'), $a$ = 0.25, $b$ = 2, $r$ = 1, $d$ = 1, $m$ = 0.4. В целом динамика такая же, что и на рис.8. Наблюдается небольшой сдвиг времени исчерпания ресурсов (т.е. момент, когда $R$ = 0): было 3, стало 4 единицы модельного времени, также повысился максимум уровня жизни $L_{max}$ (было 1.7, стало примерно1.8 единиц).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ресурсосбережение при $b > r$ позволяет, по крайней мере, выиграть время. При $b < r$ может случиться так, что скорость исчерпания ресурсов упадет практически до нуля, а технологии будут развиваться неограниченно (рис.14). При этом уровень жизни тоже возрастает неограниченно, что, согласно определению и есть устойчивое развитие.

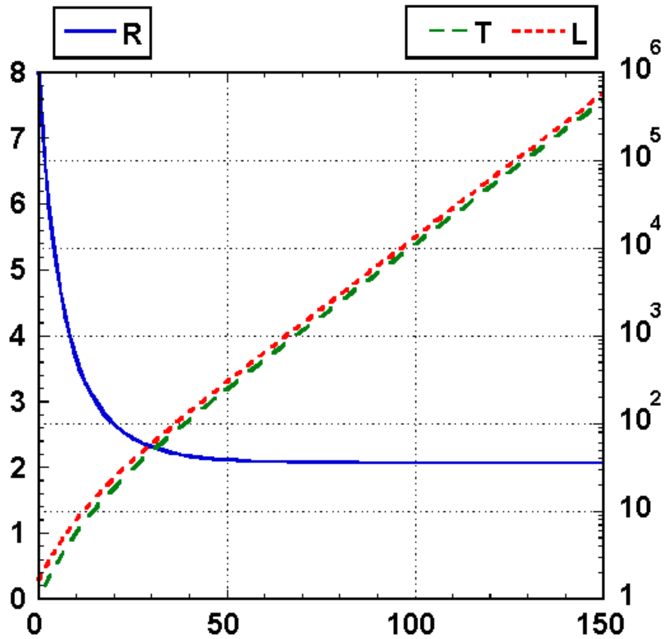


Рис. 14. Результаты по модели ресурсосбережения (4), (6), (7'), $a$ = 0.25, $b$ = 2, $r$ = 4, $m$ = 0.4. Уровень технологий и уровень жизни показаны в логарифмическом масштабе.

Это означает, что устойчивое развитие возможно и в отсутствии достаточно мощного притока ресурсов в моделируемую систему извне. Заметим также, что тип этого УР – другой в сравнении с рассмотренными выше, он представляет собой "полубесконечный" аттрактор: по одной переменной имеет место выход на стационар, по другой – на бесконечность. Таким образом, определение устойчивого развития, данное в настоящей работе, охватывает два типа: с притоком ресурсов в систему из внешней среды и без оного.

## *Заключение*

В работе была построена и проанализирована на качественном уровне феноменологическая математическая модель индустриальной и постиндустриальной стадий развития мира. Модель демонстрирует 4 типа возможных режимов динамики: 1) коллапс, 2) колебания с возможным выходом на стационар, 3) плавный выход на стационар, 4) неограниченный рост. В модели дано определение устойчивого развития (УР) моделируемой системы. Таким образом, данная модель позволяет говорить о возможности УР и показывает, какие меры на глобальном уровне для этого должны быть приняты. Интересно отметить, что указанные 4 типа мировой динамики встречались в работе Д.Медоуза [17], и он отнес 1, 2 типы к неустойчивому, а 3, 4 типы к устойчивому пути развития, что вполне согласуется с определением УР в настоящей работе. Также к плюсам модели следует отнести ее наглядность и простоту, что позволяет надеяться на адекватность полученных результатов.

## Литература

1. Наше общее будущее. Доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию. – М.: Прогресс, 1989.
2. Новая парадигма развития России (Комплексные исследования проблем устойчивого развития). – М.: Academia, МГУК, 1999.
3. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. – М.: Наука, 1978.
4. *Капица С.П.* Сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. Очерк теории роста человечества. – М.: Международная программа образования, 1999. – 240 с.
5. *Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика и прогнозы будущего. – М.: Наука, 1997.
6. *Подлазов А.В.* Основное уравнение теоретической демографии и модель глобального демографического перехода // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2001, №88.
7. *Подлазов А.В.* Теоретическая демография. Модели роста народонаселения и глобального демографического перехода // Новое в синергетике. – М.: Наука, 2003, с.324–345.
8. *Малков А.С., Коротаев А.В., Халтурина Д.А.* Математическая модель роста населения Земли, экономики, технологии и образования // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2005, №13.
9. Total midyear population for the world: 1950-2050. http://www.census.gov/ipc/www/worldpop.html
10. *Переслегин С.Б.* Самоучитель игры на мировой шахматной доске. – М.: АСТ; СПб.: Terra Fantastica, 2005.
11. Kremer M. Population growth and technological change: one million B.C. to 1990 // The Quarterly Journal .of Economics, 1993, №108, pp. 681-716.
12. *Болотин Б.* Мировая экономика за 100 лет// Мировая экономика и международные отношения. 2001, №9, с.90-114. http://www.politstudies.ru/friends/meimo9_01/bolot.zip
13. *Байков Н., Александрова И.* Производство и потребление топливно-энергетических ресурсов в XX в.// Мировая экономика и международные отношения. 2001, №9, с.27-33.
14. *Иноземцев В.Л.* За десять лет. К концепции постэкономического общества. – М.: Academia, 1998 – 576 с.
15. Сорокалетие закона Мура и интервью с его автором http://www.ferra.ru/online/market/25856/
16. Что такое закон Мура? http://www.intel.com/ru/Intel/museum/history/hof/moore.htm
17. *Медоуз Д.* За пределами роста. – М.: Прогресс, Пангея, 1994.