

# Законы развития популяции человека

*В. Н. Покровский*

Центр экодинамики, Москва 123290, Россия

Июнь 2010

## Аннотация

Представлен обзор результатов математических теорий общественного развития. Наблюдаемый рост популяции человека на Земле может быть объяснён количественно, если принять во внимание улучшение качества жизни, что связано с созданием искусственного окружения, которое может быть оценено как общественное богатство, создаваемое человеком. С палеолитических времён одежда, жилища и топливо стали такими же необходимостями для человека, как и пища. Популяция человека развивается совместно с развитием общественной производственной системы, которая основана на управляемом использовании энергии.

## Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Эмпирические факты о популяции человека</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Сдерживаемый рост популяции человека</b>	<b>7</b>
3.1	<i>Балансовое уравнение</i> . . . . .	7
3.2	<i>Закон Мальтуса – экспоненциальный рост</i> . . . . .	7
3.3	<i>Ограниченный рост – логистическая кривая</i> . . . . .	9
3.4	<i>Меняющийся предел роста</i> . . . . .	11
3.5	<i>Опыт описания демографического перехода</i> . . . . .	13
3.6	<i>Описание катастрофических событий</i> . . . . .	16
3.7	<i>О пределах применимости теории</i> . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Динамика общественного богатства</b>	<b>18</b>
4.1	Производство и балансовое соотношение . . . . .	19
4.2	Понятие стоимости . . . . .	20
4.3	Вопрос об источниках богатства . . . . .	22

4.3.1	<i>Трудовая теория стоимости</i>	22
4.3.2	<i>Производство стоимости в неоклассической теории</i>	23
4.3.3	<i>Энергетическая теория стоимости</i>	24
4.4	Закон замещения	25
4.4.1	<i>Роль производственного оборудования</i>	25
4.4.2	<i>Обобщение трудовой теории стоимости</i>	27
4.5	Динамика производственных факторов	29
4.6	Закон производства стоимости	30
4.6.1	<i>Технология и принцип продуктивности</i>	31
4.6.2	<i>Аппроксимация производственной функции</i>	32
4.6.3	<i>Сравнение с эмпирикой</i>	33
4.7	Инвестиции и изменение технологии	35
4.7.1	<i>Инвестиции и три типа развития</i>	35
4.7.2	<i>Принцип развития и безработица</i>	37
4.7.3	<i>Динамика технологических коэффициентов</i>	38
4.7.4	<i>Динамика технологического индекса</i>	40
4.7.5	<i>Принцип развития производства</i>	41
4.8	Научно-технический прогресс и производительность труда	42
<b>5</b>	<b>Динамика популяции и энергия</b>	<b>44</b>
5.1	Два энергетических потока	44
5.2	Работа и квази-работа в народном хозяйстве	46
5.3	О механизме привлечения энергии	48
5.4	Принцип развития	49
<b>6</b>	<b>Заключение: Перспективы роста</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>Литература</b>	<b>55</b>

# 1 Введение

Вопросы развития популяции человека привлекали внимание исследователей во все времена. В последнее время этот интерес в значительной мере связан с публикацией работы С.П. Капицы [1], в которой он представил картину развития человека от его первых шагов через наши тревожные дни в будущее. По представлению С.П. Капицы население Земли следует рассматривать как эволюционирующую и самоорганизующую систему, развивающуюся по своим внутренним законам, независимо от наличия тех или иных ресурсов. Смысл и значение демографической работы С.П. Капицы более проясняется при чтении трудов его последователей. Молчанов [2], в своей работе "Развитие теории С.П. Капицы. Гипотеза сети сознания" воспроизвёл все результаты С.П. Капицы, основываясь на изобретённой им элегантной математической конструкции, описывающей, совершенно в духе С.П. Капицы, саморазвитие сети сознания. Расширенная теория Молчанова-Капицы позволяет объяснить не только особенности развития популяции человека, но и особенности развития Вселенной от Большого Взрыва до далёкого будущего!

Мы очень смутно представляем, что происходило после Большого Взрыва, и не знаем, что будет происходить в отдалённом будущем, и поэтому не имеем никаких оснований утверждать, что теория Молчанова-Капицы не соответствует действительности, возникают лишь некоторые сомнения в адекватности теории для сравнительно короткого земного периода развития сети сознания, что будет обсуждаться далее. Всё же отсутствие каких-либо причинно-следственных связей воспринимается как недостаток теории: со времён Мальтуса [3] демография развивается как естественнонаучная дисциплина, пытающаяся, в традициях естественных наук, находить связь явлений. По-видимому, именно Мальтуса следует считать основоположником традиции сопоставлять изменение популяции с наличными ресурсами, важнейшим из которых в то время была земля, обеспечивающая индивидуумов популяции продуктами питания. Позднее индустрия перешла к широкому использованию энергии как важнейшего ресурса, что привело к невиданному ранее росту производства и, как следствие, изобилию продуктов питания и вещей. В свою очередь, это явление привело к изменению демографических характеристик популяции человека, и потому современное обсуждение динамики популяции человека основывается на представлении о взаимовлиянии демографического и экономического развития [4 - 11].

В статье обсуждаются явления, которые традиционно рассматриваются представителями науки, которая в начале девятнадцатого века называлась политической экономией и рассматривала широкий круг вопросов общественного развития. Со временем наука об обществе дифференцировалась, появились специфические общественные науки со своей методологией, хотя объект изучения не потерял своей цельности, и возможно сейчас на новой методологической основе возвращается интерес к изучению общества как единой сложной системы [1, 7 - 12]. Для физика это проблема интересна также тем, что связана с общей проблемой биологической эволюции, рассматриваемой в качестве одной из важнейших научных проблем, и эволюции Вселенной. При обсуждении вопроса, особенности развития популяции человека описываются в привычных для физика терминах и с приемлемой для физика степенью строгости.

## 2 Эмпирические факты о популяции человека

Открытие и изучение останков древнего человека позволяет утверждать, что человек появился в Африке около трёх миллионов лет назад, и с того отдалённого времени распространился почти по всей территории Земли. Предполагаемая история спотыкающегося движения человека через морские проливы и горные хребты во времени от двух миллионов до пятисот тысяч лет назад была проанализирована и воспроизведена с помощью компьютерной модели [13]. Подтверждая общую картину, представленную археологами и лингвистами, Cavalli-Sforza [14] описал, как, после того как на Ближнем Востоке около 10 тысяч лет назад стало активно развиваться сельское хозяйство, земледельцы, перемещавшиеся оттуда, в конце концов, достигли Европы. Около 6 тысяч лет назад перемещение племен началось из области юго-западных русских степей. Новые племена очень быстро мигрировали по Европе, распространяя свой язык, от которого произошли все европейские языки. Они сместили кочевых охотников, единственными прямыми потомками которых в Европе являются баски.

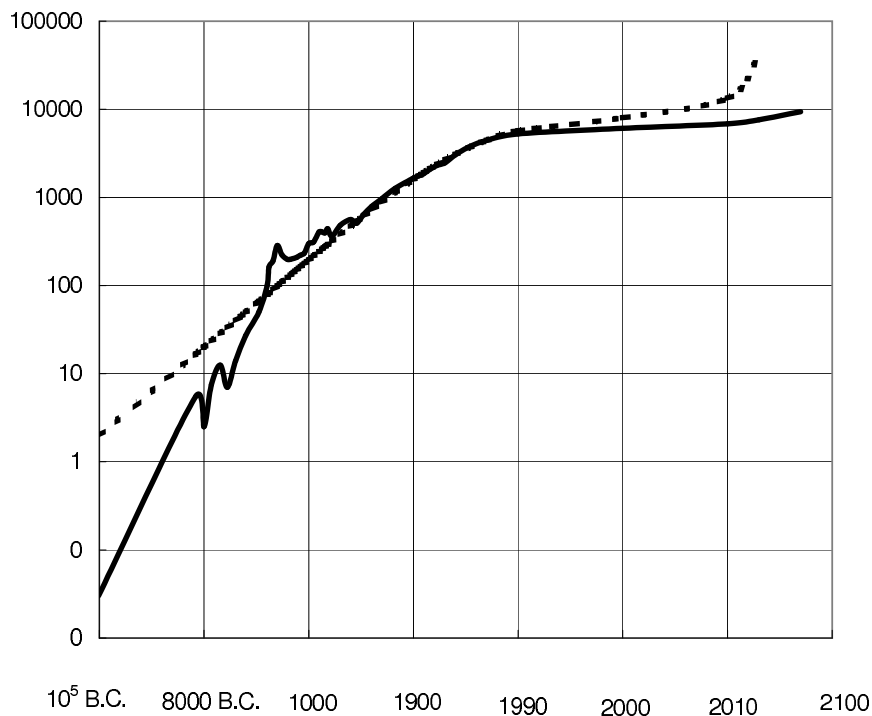
Оценки численности популяции  $N$  на Земле приведены в Таблице 1, которая полностью воспроизведена из работы [7], и показаны на Рис. 1, сделанным для настоящей публикации. Быстрый рост происходил в некоторые моменты истории, обозначаемые как культурная революция (около  $10^6$

Таблица 1 Характеристики роста популяции человека

	$N$ , $10^6$ человек	$b - d$ , $\text{год}^{-1}$	$N/\bar{N}$	$\bar{N}$ , $10^6$ человек	$a^* = r/\bar{N}$ , $\text{человек}^{-1} \text{год}^{-1}$	$W/N$ , \$/человек
$10^5$ В.С.	0.03			0.03	$10^{-6}$	1
8000 В.С.	10	0.0006	0.978	10.2	$2.71 \times 10^{-9}$	10
1000 А.Д.	280	0.0004	0.986	284	$9.75 \times 10^{-9}$	20
1650	516	0.003	0.892	579	$4.79 \times 10^{-11}$	50
1850	1,171	0.007	0.747	1,567	$1.77 \times 10^{-11}$	100
1900	1,668	0.007	0.747	2,232	$1.24 \times 10^{-11}$	200
1920	1,968	0.008	0.711	2,767	$1.10 \times 10^{-11}$	250
1960	3,308	0.019	0.314	10,530	$2.63 \times 10^{-12}$	2500
1990	5,268	0.0166	0.401	13,146	$2.11 \times 10^{-12}$	11000
1995	5,721	0.0151	0.454	12,577	$2.2 \times 10^{-12}$	14000
2000	6,168	0.014	0.495	12,471	$2.22 \times 10^{-12}$	18000
2010	7,049	0.012	0.567	12,437	$2.23 \times 10^{-12}$	30000
2020	7,919	0.0105	0.621	12,753	$2.17 \times 10^{-12}$	50000

Вторая и третья колонки дают оценки общей численности населения и темпа прироста населения по Carr-Saunders [16], Clark [17] и Durand [18]. Предполагаемые значения этих величин для 2000 - 2020 годов взяты из сборника [19].

лет назад), агрокультурная революция (около  $10^4$  лет назад) и промышленная революция, которая началась в 17 - 18 веках. В течение последних четырёх тысяч лет население Земли увеличилось от 30 миллионов до почти 7 миллиардов. Конечно, в древности и в средние века популяция человека не представляла собой единого целого: расселение человека на Земле было неравномерным, и увеличение или уменьшение численности отдельных практически изолированных популяций был неодновременным [9 -11], но для оценки тенденции развития может быть рассмотрена общая



**Figure 1** Возрастание популяции человека

Численность населения Земли в миллионах человек. Сплошная линия изображает средние значения между наибольшими и наименьшими оценками, найденными на сайте Бюро по переписи США (<http://www.census.gov/ipc/www/worldhis.html>). Пунктирная линия нарисована по соотношению (1).

численность народонаселения. Как видно на Рис.1, рост численности человечества в течение четырёх тысячелетий описывается [15] простой эмпирической формулой

$$N(T) = \frac{2 \cdot 10^{11}}{2025 - T}, \quad (1)$$

где  $T$  есть год нашего летоисчисления. Разумеется, не следует придавать сингулярности при  $T = 2025$  какой либо глубокий смысл: после 2000 года, как видно на Рис. 1, аппроксимация не применима.

Можно предположить, что огромный рост популяции человека связан с особенностями популяции человека по сравнению с другими биологическими популяциями, населяющими Землю. Действительно, в отличие от других популяций, человек преобразует среду обитания соответственно своим

удобствам, привлекая для этого природные источники энергии, увеличивающие силу его мускул. Человек создал общественную производственную систему, которая созидает и поддерживает искусственную среду обитания человека.

### 3 Сдерживаемый рост популяции человека

Со времён Мальтуса стало понятно, что наличие доступных ресурсов ограничивает рост популяции человека, и изучение этой связи оказалось центральным и плодотворным в исследовании проблемы роста популяции человека. Эта проблема допускает аналитическое рассмотрение на основе математических моделей, установленных вначале для биологических популяций [20, 21] и нашедших широкое применение при описании особенностей роста популяции человека [9 - 11]. Чтобы познакомиться с историей вопроса, читатель может обратиться к книге Коратаева и др. [22] и к замечательному очерку Турчина [23].

#### 3.1 *Балансовое уравнение*

Чтобы описать изменение численности популяции человека, как, впрочем, и любой другой биологической популяции, можно начать [24 - 26] с простого балансового соотношения

$$\frac{dN}{dt} = (b - d)N, \quad (2)$$

где  $b$  и  $d$  коэффициенты рождаемости и смертности, соответственно.

Уравнение (2) универсально и применимо к любой биологической популяции. Однако коэффициенты  $b$  и  $d$  определяются обстоятельствами жизни особей популяции. Так, эти коэффициенты могут зависеть от численности той же самой популяции  $N$  или же от некоторых других переменных и мы должны решать от каких характеристики среды обитания зависит скорость роста популяции  $b - d$ .

#### 3.2 *Закон Мальтуса – экспоненциальный рост*

Темп роста является внутренней характеристикой популяции, и в самом простом случае, когда популяция развивается при избытке пищи, пространства

и других ресурсов, можно предположить, что темп роста является постоянным

$$b - d = r.$$

Тогда, уравнение (2) имеет решение

$$N(t) = N(0) \exp rt. \quad (3)$$

В применении к популяции человека этот простой закон был сформулирован Мальтусом (Maltus [3]). Он также нашел, что, если рост популяции ничем не сдерживается, то численность популяции удваивается каждые 25 лет<sup>1</sup>, что определяет скорость роста

$$r \approx 0.0277 \text{ year}^{-1}, \quad (4)$$

так что  $1/r \approx 36.1$  год есть время, за которое численность популяции возрастает в  $e \approx 2.72$  раз. Постоянная Мальтуса определяет некоторый временной масштаб, значение которого, возможно, нуждается в уточнении. Величина близка к 42 годам – значению постоянной введённой С.П. Капицей [1]. Этот масштаб также близок ко времени жизни одного поколения.

В применении к популяции человека закон (3) может быть верен для некоторых популяций в некоторые периоды времени, но не описывает наблюдаемый рост популяции человека за всю его историю. Темп роста популяции человека меняется, и мы должны распознать факторы, влияющие на скорость роста.

---

<sup>1</sup>Мальтус (Maltus [3]) пишет в шестой главе: "It has been universally remarked that all new colonies settled in healthy countries, where there was plenty of room and food, have constantly increased with astonishing rapidity in their population. Some of the colonies from ancient Greece, in no very long period, more than equalled their parent states in numbers and strength. And not to dwell on remote instances, the European settlements in the new world bear ample testimony to the truth of a remark, which, indeed, has never, that I know of, been doubted. A plenty of rich land, to be had for little or nothing, is so powerful a cause of population as to overcome all other obstacles. ... The consequence of these favourable circumstances united was a rapidity of increase probably without parallel in history. Throughout all the northern colonies, the population was found to double itself in twenty-five years. ... In New Jersey the period of doubling appeared to be twenty-two years; and in Rhode island still less. In the back settlements, where the inhabitants applied themselves solely to agriculture, and luxury was not known, they were found to double their own number in fifteen years, a most extraordinary instance of increase. Along the sea coast, which would naturally be first inhabited, the period of doubling was about thirty-five years; and in some of the maritime towns, the population was absolutely at a stand."



### 3.3 Ограниченный рост – логистическая кривая

В большинстве случаев рост популяции ограничен некоторыми факторами (пища, жилища, болезни и т. д.), так что существует некоторое предельное постоянное значение численности  $\bar{N}$  – вместимость экосистемы. Для описание такой ситуации Ферхюльстом (Verhulst [20]) и Пёрлом (Pearl [21]) было предложено (см. подробнее в [23]) простое уравнение

$$\frac{dN}{dt} = r \left( 1 - \frac{N}{\bar{N}} \right) N, \quad (5)$$

где  $r$  есть внутренняя, биологическая скорость роста популяции – постоянная Мальтуса. В этом случае коэффициент рождаемости-смертности не постоянен и имеет вид

$$b - d = r \left( 1 - \frac{N}{\bar{N}} \right). \quad (6)$$

При постоянном значении  $\bar{N}$  коэффициент рождаемости-смертности зависит от численности популяции, а уравнение (5) оказывается нелинейным. Эта нелинейность связывается обычно с эффектом подавления роста из-за взаимной конкуренции особей популяции. В этом случае можно также ввести коэффициент взаимного влияния особей или самоотравления  $a$  соотношением

$$\bar{N} = \frac{r}{a}. \quad (7)$$

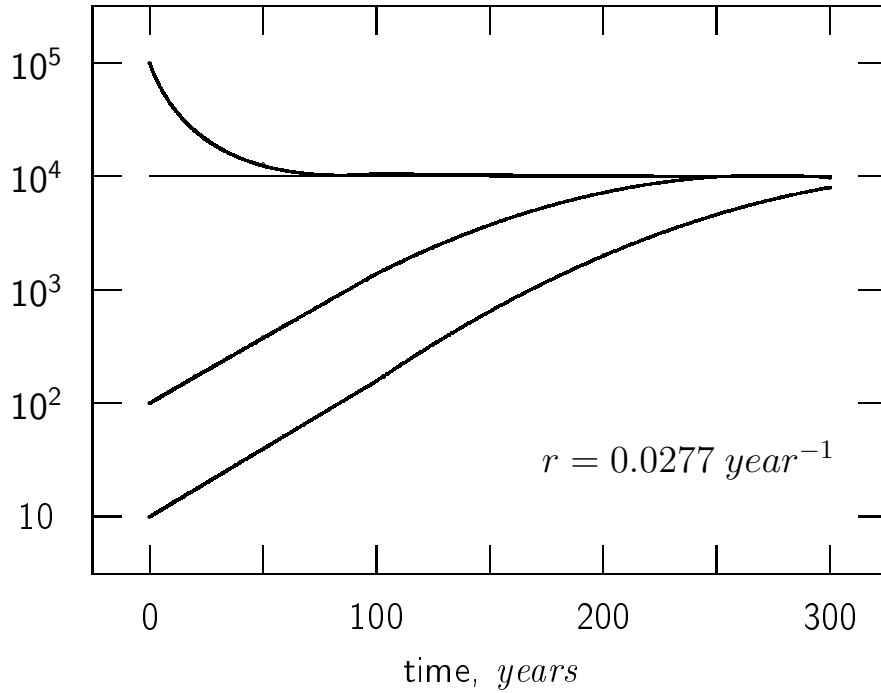
Уравнение (5) имеет стационарную точку  $\bar{N}$ , которая устойчива, поскольку  $\frac{dN}{dt} < 0$  при  $N > \bar{N}$  и  $\frac{dN}{dt} > 0$  при  $N < \bar{N}$ . Явное решение уравнения (5) может быть легко найдено, если записать это уравнение в виде

$$\frac{dN}{N} - \frac{dN}{N - \bar{N}} = r dt.$$

Интегрирование этого соотношения определяет решение – уравнение логистической кривой

$$N(t) = \frac{\bar{N} N(0) \exp rt}{\bar{N} - N(0) + N(0) \exp rt}. \quad (8)$$

Решение верно как для  $N(0) < \bar{N}$  так и для  $N(0) > \bar{N}$ . При любом начальном значении траектории приближаются к асимптотической линии  $N = \bar{N}$ , как показано на рис. 2.



**Figure 2** Эволюция численности популяции по уравнению (5)

Траектории эволюции приближаются к линии  $N = \bar{N}$  сверху при  $N > \bar{N}$  или снизу при  $N < \bar{N}$ . Вычислены при  $r = 0.0277 \text{ year}^{-1}$ ,  $\bar{N} = 10^4$ , и различных начальных значениях  $N(0)$ .

Можно предположить, что уравнение (5) может быть использовано для описания роста популяции человека в каждый момент времени. Тогда, соотношение (6) позволяет при известном значении постоянной Мальтуса оценить эмпирические значения возможного значения численности  $\bar{N}$ , которые приведены в Таблице 1. Возможные значения возрастают монотонно вместе с ростом численности популяции и имеют в настоящее время значение

$$\bar{N} \approx 1.25 \times 10^{10}. \quad (9)$$

Соответствующие значения коэффициента взаимного влияния особей уменьшаются от своего естественного (на самой раннем этапе эволюции человека) значения

$$a \approx 10^{-6} \text{ man}^{-1} \cdot \text{year}^{-1} \quad (10)$$

на несколько порядков.

Таким образом, существует нечто, что увеличивает предельную численность популяции, и это нечто может быть связано с результатами общественной производственной деятельности. Человек живёт в окружении, которое частично создано самим человеком: одежда, здания, машины, транспортные средства, сети снабжения и коммуникации, домашние приспособления и тому подобное не являются естественными образованиями. Вода, тепло и пища поступают в жилища. Всё это можно определить как искусственную среду обитания, которая является важным атрибутом человеческого существования и должна быть включена в рассмотрение. Все искусственные предметы вокруг нас имеют специальную форму и приспособлены для использования человеком в специальных целях. Формы вещей не случайны. Эта означает, что человек привносит некоторую организацию (сложность) в окружающую среду – организацию полезную для человека. Эту организацию (сложность) можно также определить как общественное (национальное) богатство, которое накапливается в результате функционирования общественной производственной системы. Рост популяции человека следует рассматривать как результат одновременного роста общественного богатства, увеличивающего предельное значение численности популяции  $\bar{N}$ .

### 3.4 *Меняющийся предел роста*

Обращаясь теперь непосредственно к формулировке уравнений для описания роста численности человека, заметим, что население Земли составлено из множества независимо развивающихся популяций [27], что особенно верно для начальной стадии развития человечества<sup>2</sup>, и потому любое уравнение, описывающее рост популяции, должно быть ковариантным

---

<sup>2</sup>С.П. Капица [1] утверждает противоположное, например, на стр. 65: "... взаимосвязанность и взаимозависимость современного мира, обусловленные транспортными и информационными потоками, объединяют всех в единое целое и дают неоспоримые возможности рассматривать сегодня мир как глобальную систему. ... И в далеком прошлом, когда людей было мало, а мир в значительной степени был разделен, его популяции медленно, но верно взаимодействовали". На это можно возразить, что для сложных систем, которыми являются популяции, даже взаимодействие в некоторых отношениях не означает, что в популяциях не могут протекать независимые процессы, которыми являются, по-видимому, демографические процессы. Во всяком случае, закон композиции совокупности зависимых или независимых популяций должен бы быть обсужден. Судя по некоторым отзывам [28, 29], концепция С.П. Капицы представляется, в лучшем случае, малообоснованной.

по отношению к произвольным разбиениям численности, то есть, применимо как к отдельным независимым популяциям, так и к совокупности популяций. Например, если  $N = N_1 + N_2$ , то уравнения роста как для  $N$ , так и для  $N_1$ ,  $N_2$  должны иметь одинаковую форму. Уравнение (5) с постоянным значением  $\bar{N}$  не удовлетворяет этому требованию, и, следовательно, не годится для описанию роста численности человека, что, впрочем, обсуждалось в предыдущем разделе. Из этих же соображений не годятся и нелинейные уравнения, записанные Капицей [1] и Подлазовым [8].

Уравнение (5) служит удобным исходным пунктом в поиске законов эволюции популяций и позволяет удобно интерпретировать динамику развития человека [9 - 11]. Согласно этому уравнению рост численности популяции не превышает возможное значение численности  $\bar{N}$ , которое меняется по своему собственному закону независимо от численности популяции. Возможное значение численности популяции  $\bar{N}(t)$  определяется достигнутым уровнем технологического и организационного развития, которое позволяет человеку иметь удобства в получении пищи, устройстве жилища, защите от болезней и другие преимущества. В качестве количественной меры исследователи принимали различные величины: например, уровень технического прогресса [10] или же накопленные ресурсы в натуральном выражении [11].

Так или иначе, высказанные утверждения отсылают к результатам деятельности человека, как факторам, определяющим условия существования человека, универсальной мерой которых может служить суммарная величина общественного богатства, приходящегося на одного человека  $W/N$ , так что, следуя работе [7], предполагаем, что существует функция

$$\bar{N} = N f\left(\frac{W}{N}\right). \quad (11)$$

Естественно, что величина  $W/N$  связана с фактором, называемым технологией или техническим прогрессом, однако в отличие от количественной оценки общественного богатства, эмпирическую оценку уровня технического прогресса сделать затруднительно. Общественное богатство включает все достижения популяции, как материальные, так и нематериальные, и оценивается в стоимостных единицах; современные значения для всех стран приводятся в статистических сборниках. Значение интересующей нас величины для США, например, приблизительно равно 40 тысяч долларов на человека, но много меньше для большинства стран мира. Оценить национальное богатство в древние времена затруднительно. Чему равна, например,

стоимость в современных ценах примитивного жилища, нескольких звериных шкур, примитивных инструментов и примитивных кухонных принадлежностей? Таблице 1 содержит возможные оценки, которые, несомненно, нуждаются в уточнении. Однако увеличение богатства со временем на несколько порядков не кажется невероятным.

Значение возможной численности  $\bar{N}$  увеличивается с увеличением общественного богатства  $W$ . В древние времена скорость роста общественного богатства была очень мала и значение численности населения  $N$  было близко к значению возможной численности  $\bar{N}$  как видно по Таблице 1. Отношение  $N/\bar{N}$  было близко к единице в ранние годы эволюции популяции, и отклонение этой величины от единицы может быть связано линейно с общественным богатством на одного человека

$$\frac{N}{\bar{N}(W/N)} \approx 1 - h \frac{W}{N}, \quad h \frac{W}{N} \ll 1 \quad (12)$$

где  $h$  есть коэффициент влияния общественного богатства на скорость роста популяции. Можно обратиться к данным в Таблице 1, чтобы получить грубую оценку коэффициента влияния

$$h \approx 0.002 \text{ man} \cdot \text{dollar}^{-1}.$$

Возможное значение численности популяции  $\bar{N}(t)$  увеличивается монотонно при увеличении общественного богатства, однако коэффициент рождаемости-смертности может проявлять немонотонную зависимость. Обнаружилось, что коэффициент рождаемости-смертности как популяции человека в целом, так и населения отдельных стран проходит точку максимума, в чём можно убедиться, взглянув, например, на рис. 3 статьи С.П. Капицы ([1], стр. 67). Это событие определяется как демографический переход, которому можно дать объяснение с точки зрения рассматриваемых представлений.

### 3.5 Опыт описания демографического перехода

Для более детального описания рассмотрим отдельно коэффициенты рождаемости и смертности, каждый из которых по предположению зависит от благосостояния, которое в простейшем случае характеризуется одной величиной<sup>3</sup> – общественным богатством на одного человека  $W/N$ , то

---

<sup>3</sup>Для описания особенностей роста популяции Коротаев и др. [9] использовали две переменные: величину, которая по смыслу почти совпадает со скоростью роста

есть, будем считать, от одного безразмерного аргумента

$$x = h \frac{W}{N}. \quad (13)$$

В соответствии с наблюдениями полагаем, что с увеличением благосостояния, как коэффициент рождаемости, так и коэффициент смертности монотонно убывают от некоторой величины, условно принимаемой равной коэффициенту Мальтуса, до некоторого положительного предела, что простейшим образом можно аппроксимировать функциями

$$b = r \left( 1 - \frac{\gamma x}{1 + \beta x} \right), \quad \frac{\gamma}{\beta} < 1 \quad (14)$$

$$d = r \left( 1 - \frac{x}{1 + \alpha x} \right), \quad \alpha > 1 \quad (15)$$

Мы полагаем, что скорость приближения к пределу может быть различной у двух коэффициентов, причём уменьшение коэффициента рождаемости значительно запаздывает по сравнению с уменьшением коэффициента смертности, что определяет

$$\gamma \ll 1. \quad (16)$$

Мы предполагаем также, что при  $x \rightarrow \infty$  численность населения стабилизируется, то есть становится постоянной, так что пределы должны быть одинаковы и потому

$$\beta = \alpha \gamma. \quad (17)$$

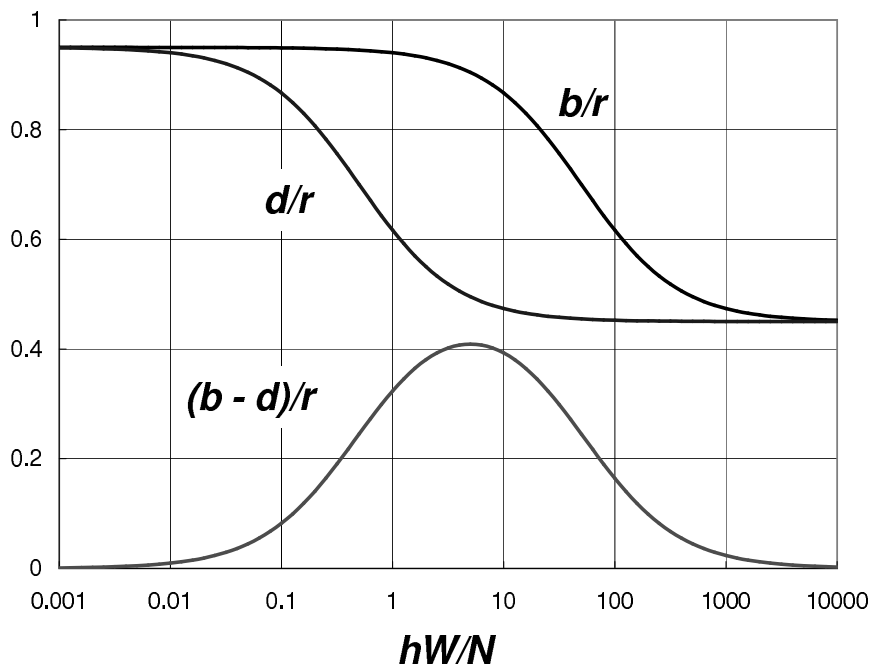
Конечно, возможен вариант, при котором скорость роста популяции остаётся конечной и равной  $(b - d)_\infty$  при  $x \rightarrow \infty$ .

Записанные выше требования определяют выражение для коэффициента рождаемости-смертности

$$b - d = r \left( \frac{x}{1 + \alpha x} - \frac{\gamma x}{1 + \alpha \gamma x} \right), \quad (18)$$

---

благосостояния  $W/N$ , и *грамотность*, как фактор, влияющий на уменьшение рождаемости. Однако грамотность может рассматриваться как составная часть общественного богатства и выделение этой части, без рассмотрения других, представляется искусственным. Возможно, по-видимому, указать некоторые другие составляющие общественного богатства, влияющие на уменьшение или увеличение рождаемости. Однако, столь детальное рассмотрение неуместно при нашем грубом описании, и мы ограничиваемся рассмотрением влияния одной характеристики – благосостояния, то есть величины совокупного накопленного общественного богатства (материального и нематериального, что включает грамотность) на одного человека.



**Figure 3** Демографический переход

Кривые представляют зависимости (14), (15) и (18) при значениях параметров:  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 0.02$  и  $\gamma = 0.01$ .

первый член разложения которого

$$b - d \approx rx \tag{19}$$

совпадает с выражением для коэффициента рождаемости-смертности по (6), (12) и (13).

При сформулированных условиях уравнение (18) обладает максимумом в точке, которая определяется как точка демографического перехода. До точки демографического перехода коэффициент рождаемости-смертности возрастает, а после точки демографического перехода падает. Ситуация иллюстрируется на рис. 3. Реальные зависимости могут оказаться более сложными: рост популяции может сопровождаться не одним, как в рассмотренном примере, а несколькими демографическими переходами и демографическими циклами, которые могли происходить в более ранние периоды развития

человечества. Эти явления также описываются теориями, в основе которых лежит уравнение Ферхюльста-Пёрла [11].

Чтобы получить условие демографического перехода в других терминах, найдём условие экстремума коэффициента рождаемости-смертности

$$b - d = r \left( 1 - \frac{N}{\bar{N}} \right), \quad (20)$$

рассматривая как фактическую, так и возможную численности популяции человека,  $N$  и  $\bar{N}$ , как функции времени. Экстремальное значение этой функции определяет условие демографического перехода как условие равенства скоростей роста функций  $N$  и  $\bar{N}$

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{\bar{N}} \frac{d\bar{N}}{dt}. \quad (21)$$

До точки демографического перехода фактическая численность населения близко следует за убегающим пределом. После точки демографического перехода скорость возрастания численности оказывается меньше скорости возрастания предела.

### 3.6 Описание катастрофических событий

Численность популяции человека в развитии, как правило, всегда меньше возможного значения, которое определяется текущим благосостоянием

$$N < \bar{N} \left( \frac{W}{\bar{N}} \right). \quad (22)$$

Но что произойдёт, если случится катастрофа и внезапно все системы жизнеобеспечения исчезнут? Общественное богатство уменьшается до некоторого значения,  $W_k$ , и новое значение возможной численности падает до некоторого уровня, который может оказаться меньше или даже много меньше чем текущее значение численности

$$N \gg \bar{N}_k. \quad (23)$$

При малых временах уравнение (8) определяет изменение численности популяции в виде линейного закона

$$N(t) = N(0) \left[ 1 + \left( 1 - \frac{N(0)}{\bar{N}_k} \right) rt \right]. \quad (24)$$



При выполнении условия (23) закон уменьшения численности может быть записан в виде

$$N = N(0) \left( 1 - r \frac{N(0)}{N_k} t \right). \quad (25)$$

Это – закон уменьшения численности популяции в случае мировой катастрофы.

Этот закон может быть также приложим к случаям, когда элементы накопленного общественного богатства внезапно исчезают, например, к случаю осаждённого города. По какому закону вымирало население блокадного Ленинграда? При начальной численности 5 миллионов человек за два с половиной года блокады погибло по разным оценкам от 0.5 до 1.5 миллиона человек. Если допустить справедливость линейного закона, то формула (24) при  $r = 0.0277$  определяет, что начальная численность населения примерно в четыре раза превышала возможное значение численности  $N_k$ .

### 3.7 *О пределах применимости теории*

По-видимому, невозможно объяснить, не ссылаясь на общественную производственную систему – способ приспособления человека к условиям существования, увеличение популяции человека от очень маленькой группы миллион лет назад до приблизительно 6 миллиардов в 2000 году. Изложенные выше соображения, применённые к популяции человека, определяют общее направление развития через простой механизм эволюции: сохраняются и накапливаются вещи и идеи, которые необходимы или полезны для выживания человека.

Рассматривая популяцию человека в целом, можно заметить по таблице 1, что темп роста популяции начал уменьшаться, начиная примерно с 1960 года, несмотря на очевидное увеличение общественного богатства. С первого взгляда это могло бы означать, что улучшение условий жизни теперь подходит к своему пределу, и увеличение общественного богатства в будущем не будет влиять на темп роста населения. Возможна также и другая точка зрения: на современном этапе развития общественной производственной системы часть национального богатства  $W$ , учитываемая в статистических отчётах, не только не способствует выживаемости особей популяции, но и иногда прямо нацелена на уничтожение индивидуумов.

К тому же следует принимать во внимание, что суммарное общественное богатство распределено неравномерно, как внутри локальной популяции, так и по отношению к различным локальным популяциям. Всё это приводит к тому, что часть национального богатства должна быть исключена из рассмотрения: среднее значение  $W/N$  не соответствует истинному значению благосостояния для большинства индивидуумов. Возможно, что современное замедление подобно замедлению после аграрной революции, и необходимы какая-то революция в организации общественного производства и распределения для того, чтобы наблюдаемое замедление сменилось ростом.

В применении к отдельным локальным популяциям (нациям) теория может оказаться полезной для оценки численности популяции: рост населения в бедных странах ещё долго будет зависеть от улучшения условий существования. Исключительно значение для понимания законов развития имеют исследования эволюции локальных популяций в прошлом [10, 11, 22]. Было замечено, что развитие локальных популяций, как правило, носит циклический характер, для объяснения которого, кроме переменных так или иначе связанных с накопленным богатством, исследователи привлекают другие переменные, связанные с описанием элиты общества и перераспределением ресурсов. Простые модели структурно-демографической теории позволяют описать рост и падение локальных популяций человека [10, 11, 22]. Можно думать, что найденные закономерности могут быть использованы для описания будущего развития человеческой популяции, на основании чего может быть предложен надлежащий социальный механизм регулирования роста популяции.

## 4 Динамика общественного богатства

Наверное, не может быть возражений против общей идеи благотворного влияния богатства на процветание человечества. Человек живёт в искусственно созданном окружении – в окружении, которое человек сам сконструировал по своим потребностям. Человек строит жилища, в которые поступает тепло и вода, производит одежду и пищу. Всё это, в том числе и нематериальные ценности (системы знаний, организационные схемы, этические правила, произведения искусства и тому подобное), представляет общественное богатство, которое может быть учтено в условных денежных единицах и обозначено символом  $W$ , использованном в предыдущем разделе.

## 4.1 Производство и балансовое соотношение

Для производства и поддержания общественного богатства существует производственная система общества, которая состоит из многих производственных единиц: заводов, фабрик, транспортных коммуникаций, сетей энергоснабжения и много всего прочего, что создаёт всё, в чём нуждается человек. В простом, как говорят, макроэкономическом (в противопоставлении микроэкономическому подходу) приближении производственная система может быть описана, следуя Леонтьеву [30], как совокупность чистых отраслей. В простейшем случае, общественная производственная система рассматривается как единая отрасль, производящая валовой внутренний продукт  $Y$ , который представляет оценку стоимости продуктов: машин и оборудования, домов и различных сооружений, одежды и продуктов для обеспечения жизнедеятельности. Производство вещей сопровождается потоками денег. Если потоки денег не могут существовать и быть рассмотрены в отрыве от реального производства, то реальное производство может быть рассмотрено без потоков денег, чем мы и ограничиваемся в этой статье, считая, что производство стоимости оценивается в условных единицах постоянной покупательной способности, в отличие от реальной ситуации, когда масштаб стоимости меняется при измерении, что создаёт проблемы в реальной жизни и при теоретическом рассмотрении.

Валовой внутренний продукт представляет оценку стоимости всех вещей и услуг, произведенных обществом за единицу времени. Это является оценкой результатов деятельности общества, которые направлены, на поддержание и развитие популяции как общественной системы. По назначению эту величину можно разделить на три части. Первая часть включает продукты, которые непосредственно потребляются людьми, в количестве  $C$ , вторая – продукты, необходимые для поддержания и развития общественной производственной системы, – инвестиции  $I$  и – третья часть – некоторые накопления  $G$  в материальной и нематериальной форме, которые необходимы обществу как целому. Таким образом,

$$Y = I + G + C. \quad (26)$$

Изменение общественного богатства определяется простым балансовым уравнением

$$\frac{dW}{dt} = Y - C - \mu W. \quad (27)$$

Правая часть уравнения представляет разницу между результатом

продуктивной деятельности членов общества за некоторую единицу времени  $Y$  (валовым внутренним продуктом) и исчезновением общественного продукта за этот же период времени, как в результате непосредственного потребления  $C$ , так и из-за старения или износа  $\mu W$ . Величина  $\mu$  является коэффициентом амортизации, принимаемым для простоты единым для всех компонент общественного богатства.

Уравнением (27) задача о возрастании богатства сводится к вопросу об описании функционирования производственной системы, что является одной из центральных проблем экономической науки. В макроэкономическом (феноменологическом) описании проблема сводится к установлению соотношения между выпуском  $Y$ , измеренным в условных денежных единицах, и некоторыми универсальными характеристиками производственных процессов – производственными факторами, относительно выбора, которых до сих пор высказываются различные мнения. Чтобы рассмотреть этот вопрос подробнее, необходим небольшой экскурс в основания политической экономии с целью напомнить необходимые для обсуждения понятия.

## 4.2 Понятие стоимости

Понятие *продукта* оказывается одним из фундаментальных понятий, и может быть определено как нечто, что произведено для того, чтобы быть потреблённым. При этом не имеет значения, совпадает ли момент потребления с моментом производства, как, например, в случае транспортных услуг, или не совпадает. В последнем случае продукт существует в течение некоторого времени в его материальной или нематериальной форме.

Продукт можно рассматривать как единство потребительной стоимости (use-value) и стоимости производства (production-value), что позволяет продуктам участвовать в процессах обмена. В обмене, продукты противостоят друг другу, и потребительная стоимость одного продукта противостоит потребительной стоимости другого. Продукты с различными потребительными стоимостями могут быть сравнены вследствие того, что производственные стоимости всех продуктов отличаются только по количеству, но не по качеству. Таким образом, свойство, которое позволяет продуктам быть сравненными и обмененными, является их *меновая стоимость* или просто *стоимость*. Стоимость – это атрибут продукта, также как масса – атрибут материи.

Полагают, что продукты обмениваются в среднем по их стоимостям. Это – аксиома, которая дает относительную меру стоимости, позволяет

приписывать определенную величину стоимости продуктам и оценивать стоимость набора продуктов. Стоимость измеряется в условных денежных единицах, которые устанавливаются, когда признанное средство обращения (деньги) вводится в экономическую систему. Благодаря всеобщему обмену с помощью денег, могут быть оценены все продукты, что рассматривают как оценку их *стоимости* в произвольных денежных единицах (рубль, доллар, фунт стерлингов, евро *и так далее*). Можно оценить, например, множество услуг и предметов потребления, произведенных нацией в течение года. Это количество называют валовым внутренним продуктом (ВВП).

Записанные выше утверждения не оригинальны, они принадлежат величайшим мыслителям.<sup>4</sup> Ещё Аристотель, анализируя обмен различных вещей, писал [32, книга 5, секция 5] "... все вещи, которые обмениваются, должны быть, так или иначе, сопоставимы". Маркс ([33], р. 14) писал: "..., когда товары обмениваются, их меновая стоимость проявляется как нечто полностью независимое от их потребительной стоимости. Но если мы абстрагируемся от их потребительной стоимости, то остаемся их стоимость как определено выше. Поэтому, общее свойство, которое проявляется в меновой стоимости обмениваемых товаров, всякий раз, когда они обмениваются, является их стоимость".

Механизм обмена тщательно изучался. Некоторые из исследователей подчеркивали полезность продукта и говорили, что нет никакой стоимости без полезности, так что стоимость следует рассматривать как рыночную оценку полезности вещи. Другие исследователи утверждали, что существуют некоторые вещи (вода и воздух, например), которые имеют полезность без рыночной стоимости, так что, содержание стоимости закладывается при производстве вещей, и следует обратиться к этой стороне и принять во внимание издержки производства вещей. Позже было понято (вклады Вальраса и Маршалла обычно особенно подчеркиваются [34]), что и стоимость производства (предложение) и полезность (спрос) взаимно определяют

---

<sup>4</sup>Краткая история и анализ понятия стоимости изложены, например, А.Н. Усовым [31]. Начав с понятий потребительной и производственной стоимости, Усов показал, как следует ввести понятие стоимости, свободное от каких либо заранее приготовленных интерпретаций. Каждому, кто учился в высшем учебном заведении в СССР до 1990 года приходилось заучивать неверное утверждение, что "стоимость это затраты труда". Однако нет никакой необходимости заранее сводить понятие стоимости к затратам труда. Факторные теории стоимости, то есть сведение стоимости к труду, капиталу и другим универсальным факторам производства рассматривается в следующем разделе.

стоимость вещей. По словам Маршалла, "мы могли бы так же разумно дискутировать, верхнее или нижнее лезвие ножниц режет бумагу, как и то, определяется ли стоимость полезностью или затратами производства".

Понятие стоимости в экономических науках оказывается столь же важным, как понятия энергии и энтропии в физических науках, и саму теоретическую науку о функционировании и развитии народного хозяйства, которую можно назвать *экодинамикой*, следует определить как науку, которая исследует процессы появления, движения и исчезновения стоимости, мало интересуясь ее материальным носителем.<sup>5</sup> Рассмотрение потоков стоимости (в произвольных денежных единицах) в народном хозяйстве позволяет создать общие описательные схемы производства и потребления продуктов [34].

### 4.3 Вопрос об источниках богатства

Несомненно, богатство создается в процессе производства, но исследователей всегда интересовал вопрос можно ли найти некий универсальный источник богатства, или, иначе говоря, источник стоимости. Иными словами, может ли меновая стоимость, определённая в предыдущем разделе, быть определена через некоторые универсальные производственные факторы. Однако до сих пор вопрос о такого рода соотношениях, которые называют факторными теориями стоимости, является предметом обсуждения.

#### 4.3.1 Трудовая теория стоимости

Бенджамин Франклин, известный своими работами по электричеству [36], одним из первых сформулировал утверждение, что мерой стоимости является труд, затраченный при производстве [37]. Эта идея явилась центральной в политической экономии начала девятнадцатого столетия, нашла особенное развитие в трудах Адама Смита, Давида Рикардо и Карла Маркса и получила название трудовой теории стоимости. И в настоящее время не возникает разногласий по поводу того, что затраты

---

<sup>5</sup>В отличие от классиков политической экономии, приверженцы современной *economics* по возможности избегают понятия стоимости - они предпочитают говорить о ценах, и сама наука *economics* определяется как "... the study of how societies use scarce resources to produce valuable commodities and distribute them among different groups" ([35], p 5). Но многие исследователи полагают, что в основании экономических наук лежит понятие стоимости.

труда (в обобщённом смысле, включая труд крестьян, рабочих и служащих)  $L$  при производстве являются важнейшим производственным фактором, то есть источником стоимости, но вопреки утверждениям Смита и Маркса, этот фактор не может рассматриваться как единственный: темп роста использования труда в производстве, как оказалось, оказывается меньшим чем темп роста продукции в развитых экономических системах, и, для объяснения явления экономического роста, другие факторы производства должны были быть добавлены в рассмотрение.

#### 4.3.2 *Производство стоимости в неоклассической теории*

На следующем этапе развития теории в качестве источника стоимости были введены в рассмотрение другие универсальные производственные факторы, в частности, количество производственного оборудования или основных производственных фондов, оцениваемых их стоимостью  $K$ . Эта величина удовлетворяет стандартному балансовому соотношению

$$\frac{dK}{dt} = I - \mu K, \quad (28)$$

где символ  $I$  представляет производственные инвестиции – часть валового внутреннего продукта, которая накапливается в материальной форме производственного оборудования (см. соотношение 26), в то время как другая часть валового продукта идет на потребление и непроизводственное накопление. Заметим, что инвестиции – это не только и не столько деньги. Инвестиции в конечном итоге должны быть материальны – это постройки, новое оборудование, новые технологии. Второе слагаемое в правой стороне уравнения (28) описывает уменьшение капитала из-за выбытия из службы с коэффициентом выбытия или обесценивания  $\mu$ .

В неоклассической теории экономического роста предполагают, что выпуск, или производство стоимости,  $Y$  (в денежных единицах), является функцией затрат труда  $L$ , измеренных, например, в рабочих часах за год, и основного производственного капитал  $K$ , измеренного его стоимостью. Для интерпретации эмпирических данных были предложены различные формы производственной функции, но исследователи часто используют простое представление – производственную функцию Кобба-Дугласа [38]

$$Y = Y_0 \frac{L}{L_0} \left( \frac{L_0}{L} \frac{K}{K_0} \right)^\alpha, \quad (29)$$

где индекс  $\alpha$  является некоторой внутренней характеристикой производственной системы. Записанное соотношение формализует предполагаемый эффект замещения труда капиталом. Хотя гипотеза замещения труда капиталом и даже само понятие капитала (стоимость производственного оборудования) сурово критиковалась [39 - 41], эти понятия сохранились до сих пор в основании неоклассической теории производства, хотя для надлежащего описания эмпирических ситуаций введены понятия *трудовые услуги* и *услуги капитала*, которые несколько отличается от понятий *труд* и *капитал* и рассматриваются как истинные источники роста [42 - 44]. Фактически, эта интерпретация неявно включает некоторые неизвестные факторы производства, которые оказались объектами исследования в недавние десятилетия. С целью усовершенствования теории, при сохранении структуры неоклассического подхода, новые производственные факторы, вроде технологии, человеческого капитала, запаса знаний и другие были введены и рассмотрены [45, 46].

#### 4.3.3 Энергетическая теория стоимости

С другой стороны, многие исследователи [47 - 55] утверждают, что потребление энергии в производстве является универсальным фактором и должно быть включено в описание процесса производства стоимости. Более того, утверждается, что энергию следует рассматривать как единственный источник и меру стоимости, и само понятие стоимости может быть сведено к понятию энергии. Эти высказывания можно считать формулировкой энергетической теории стоимости, которая, однако, несмотря на длинную и славную историю развития, не имеет точной и законченной формулировки. Рассматривая развитие энергетической теории, Мировски ([56], p.816) заключил, что "... энергетическая теория стоимости никогда не была развита ни с какой серьезностью или совместным усилием ни одной из групп...'

Основная проблема заключается в том, чтобы, рассматривая процесс создания некоторого продукта, корректно оценить количество энергии (работы людей и машин), необходимой для создания продукта стоимостью одна денежная единица, можно сказать, "энергетическое содержание денежной единицы". При этом реализовались два подхода. При "широком" подходе учитываются все затраты энергии, используемой как непосредственно в производстве, так и при получении промежуточных продуктов. Этот подход представлен некоторыми общими схемами оценки естественных



и искусственных потоков энергии (или exergy, или emergy), развитыми в последние годы [53 - 55]. При другом, "узком" подходе учитываются только энергетическая оценка усилий людей и непосредственная (чистая) работа производственного оборудования [57]. Оценка величины "энергетического содержания денежной единицы" при "широком" подходе зависит, очевидно, от эффективности преобразования энергии в технологических процессах, в то время как при "узком" подходе оцениваемая величина представляет истинную работу, очищенную от несовершенств передачи энергии, и представляющую универсальную, то есть независимую от места и времени, меру стоимости.

## 4.4 Закон замещения

### 4.4.1 Роль производственного оборудования

Чтобы прояснить вопрос об источниках стоимости, следует ещё раз внимательно присмотреться к производству, которое можно рассматривать как совокупность процессов преобразования вещества, для чего требуется работа.<sup>6</sup> Согласно известным представлениям о производстве, работа может быть совершена работающими людьми и/или некоторым внешним источником энергии (вода, ветер, уголь, нефть, и так далее). Например, чтобы размолоть зерно в муку, можно использовать или ручную мельницу, или водяную мельницу, или ветряную мельницу, или паровую мельницу. В последних случаях, работа, выполняемая мускулами, заменяется работой падающей воды, или ветра, или тепла.

Возможно, что первый, кто написал о функциональной роли машин в производстве, был Галилео Галилей. Он понял, что все машины передают и прилагают силу, что можно рассматривать как специальные случаи принципа рычага и точки опоры. Видный историк науки и техники Дональд Кардвелл [58] писал, что Галилео в своих заметках *О движении* (1590) и *О механике* (1600) осознал, что "функцией машины является восприятие и использование, возможно лучшим способом в целях человека, сил, которые могут быть найдены в природе... критерием является сделанный объем работы – как бы он ни оценивался – а не субъективная оценка усилий, затраченных на выполнение этого" (pp. 38-39). Преимущество машин в том, что они используют дешевые источники энергии, потому что "падение воды реки стоит немного или вообще ничего".

---

<sup>6</sup>Работу следует понимать как процесс преобразования энергии из одной формы в другую, например, из механической в тепловую форму.

То, что деятельность машин должна быть включена в экономическое описание производства, было ясно осознана Марксом [33], который описал функциональную роль машин в производственных процессах в Главе XIII *Машины и крупная промышленность* своего главного сочинения следующими словами:

Если мы присмотримся ближе к машине-орудию, или собственно рабочей машине, то мы в общем и целом увидим в ней, хотя часто и в очень измененной форме, все те же аппараты и орудия, которыми работают ремесленник и мануфактурный рабочий; но это уже орудия не человека, а орудия механизма, или механические орудия (с. 384). Итак, рабочая машина - это такой механизм, который, получив соответственное движение, совершает своими орудиями те самые операции, которые раньше совершал рабочий подобными же орудиями. Исходит ли движущая сила от человека или же, в свою очередь, от машины - это ничего не изменяет в существе дела (с. 385). В качестве машин средство труда приобретает такую материальную форму существования, которая обуславливает замену человеческой силы силами природы и эмпирических рутинных приёмов – сознательным применением естествознания (с. 397). Если не считать средние ежедневные издержки машин и орудий или ту составную часть стоимости, которую они присоединяют к продукту ежедневным средним износом и потреблением вспомогательных материалов, например, масла, угля и так далее, то окажется, что они действуют даром, как силы природы, существующие без содействия человеческого труда (с. 399).

Эти примеры иллюстрируют, что как физики, так и экономисты прошлого распознали уникальную роль машин в производственных процессах, определяемую как *замещение работы человека работой машин, движимых внешними источниками энергии*, в то время как степень этой замены зависит от применяемой технологии. Важно иметь в виду, что, в то время как производственное оборудование (капитал) является необходимым фактором, работа может быть заменена только работой, или, если сказать по-другому, работа не может быть заменена капиталом.

#### 4.4.2 Обобщение трудовой теории стоимости

Чтобы описать эффект замещения, вводится и рассматривается [59] новый производственный фактор – истинную работу производственного оборудования  $P$ . Легко понять, что работа замещения влияет на величину произведённой стоимости. Действительно, можно рассмотреть деятельность двух предприятий, выпускающих идентичную продукцию. Можно полагать, что одно из предприятий использует технологию, которая требует некоторое количество труда  $L$  и замещающей работы  $P$ , а другое предприятие, производя то же самое количество того же самого продукта, использует технологию с количествами факторов производства  $L - \Delta L$  и  $P + \Delta P$ . Так как продукты, как полагаем, являются идентичными, меновые стоимости продуктов каждого предприятия на рынке равны, несмотря на различие в потреблении труда. Таким образом, стоимость не может быть определена только затратами труда, но должным образом учтённая работа природных сил должна быть принята во внимание. Чтобы произвести одно и то же количество стоимости, уменьшение в затратах труда должно быть компенсировано увеличением работы внешних источников энергии

$$-\beta \Delta L + \gamma \Delta P = 0,$$

где введены производительности  $\beta$  и  $\gamma$  соответствующих факторов производства. Таким образом, одновременно с работой человека, работа природных сил появляется как важный фактор производства. Легко видеть, что величина  $\beta/\gamma$  определяет работу внешних источников, которая необходима для того, чтобы заменить единицу усилий человека, чтобы получить эквивалентный эффект, то есть равные произведённые стоимости. Поскольку работа внешних сил, замещающих усилия человека, невозможна без дополнительного производственного оборудования, то это явление было воспринято и описано ранее как замещение труда капиталом.

В более общем случае, работа, выполненная людьми  $L$  и источниками производительной энергии  $P$ , создаёт набор продуктов с обменной стоимостью  $Y$ , так что можно написать, предполагая, что производственная система сама по себе остается неизменной, соотношение между дифференциалами величин

$$dY = \beta dL + \gamma dP. \quad (30)$$

Коэффициенты  $\beta > 0$  и  $\gamma > 0$  соответствуют стоимости, произведённой увеличением трудозатрат при постоянном потреблении внешней энергии

и увеличением работы производственного оборудования при постоянных трудозатратах; в соответствии с существующими терминами экономических теорий эти величины могут быть названы предельными производительностями соответствующих факторов производства.

Два фактора производства: трудозатраты и работа внешних источников энергии взаимозаменяемы и, в этом смысле, являются эквивалентными, так что труд остается, в конечном счете, используя слова Адама Смита, "единственно универсальной, так же как единственно точной мерой стоимости, или единственным стандартом, по которому мы можем сравнить стоимости различных товаров во все времена и во всех местах". Принимая во внимание эффект замещения, можно также сказать, что единственная универсальная и точная мера ценности – оценка усилий работающих или других агентов, используемых для производства. Основываясь на эффекте замещения, можно оценить общее количество работы, необходимое для того, чтобы произвести вещь или услугу, и сопоставить это количество с рыночной стоимостью. Это могло бы дать абсолютную меру стоимости, значение чего трудно переоценить.<sup>7</sup> Конечно, это не значит, что стоимость эквивалентна энергии, скорее, стоимость оказывается близкой родственницей энтропии с обратным знаком [61].

Описанное расширение трудовой теории стоимости имеет непосредственное соотношение с обычной неоклассической теорией, которая рассматривает капитал и труд как главные источники производства стоимости. При введении третьего фактора производства – замещающей работы оборудования или производительной энергии, обсуждаемая теория помогает осознать надлежащую роль энергии в производстве стоимости, с одной стороны, и избавиться от противоречий традиционной неоклассической теории, с другой стороны, то есть примирить различные подходы к теории производства. Можно думать, что замещающая работа оборудования или производительная энергия является тем самым производственным фактором, который ищут представители современных эндогенных теорий экономического роста [45, 46] для того, чтобы описать роль запаса знаний или человеческого капитала, как существенных факторов производства и подлинных источников экономического роста. Действительно, чтобы использовать внешнюю энергию в производстве, нужно иметь доступные источники энергии и оборудование,

---

<sup>7</sup>Как писал известный финансист Lietaer ([60], p.254): 'The world has been living without an international standard of value for decades, a situation which should be considered as inefficient as operating without standard of length or weight'.

которые используют энергию для производства. Некоторые приспособления должны быть изобретены, сделаны и установлены для работы, так что наличие производительной энергии определено фундаментальными результатами науки, исследованиями, проектными работами, и материализацией всего человеческого воображения о том, как использовать энергию для производства.

## 4.5 Динамика производственных факторов

Закон замещения труда работой внешних источников энергии позволяет развить теорию, которая включает в рассмотрение некоторые обобщённые характеристики технологии [7, 59]. Работа, которая должна быть выполнена, чтобы произвести что-то, может быть сделана непосредственно работающими, или же некоторыми приспособлениями, которые используются, чтобы сделать ту же самую работу с помощью внешних источников энергии (см. [33], глава 13). Технология определяет, какое количество трудозатрат  $L$  и работы внешних источников (ветер, вода, уголь, нефть и другое)  $P$  необходимо для производства. Расширение производства, характеризующего изменениями производственных фондов (накопленной стоимости), требует дополнительных трудозатрат и замещающей работы оборудования, так, что динамика факторов производства может быть записана как пара уравнений баланса

$$\frac{dL}{dt} = \lambda I - (\nu' + \mu)L, \quad \frac{dP}{dt} = \varepsilon I - (\eta' + \mu)P. \quad (31)$$

Первые члены в правой стороне этих отношений описывают увеличение потребления факторов производства при введении инвестиций  $I$ , которые, как можно полагать, являются действительным двигателем развития производства. Как универсальные характеристики производственного оборудования, здесь введены величины  $\lambda$  и  $\varepsilon$ , которые определяют необходимые количества, соответственно, трудозатрат и производительных энергозатрат на единицу (в стоимостной мере) введенного оборудования. Вторые слагаемые в правых частях уравнений (31) отражают уменьшение производственных факторов при удалении или изнашивании части оборудования. Уменьшение количества производственного оборудования (капитала) характеризуется коэффициентом амортизации  $\mu$ . Величины  $\nu'$  и  $\eta'$  описывают эффективное дополнительное обесценивание производственного оборудования во время срока службы. Если установленное технологическое оборудование не меняет своего качества в течение времени службы (что будет принято для простоты в последующем

изложении), величины  $\nu' = 0$  и  $\eta' = 0$ , и все коэффициенты обесценивания в уравнениях (28) и (31), оказываются идентичными. Заметим, что уравнения баланса (31) для факторов производства являются фактически определениями технологических коэффициентов системы производства и не содержат каких либо предположений.

Характеристики технологии: трудотребование и энерготребование,  $\lambda$  и  $\varepsilon$ , меняются в течение времени, и удобно ввести безразмерные технологические переменные

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{K}{L} \lambda, \quad \bar{\varepsilon}(t) = \frac{K}{P} \varepsilon. \quad (32)$$

Если эти величины оказываются меньше единицы, это означает, что трудосберегающие и энергосберегающие технологии вводятся в этот момент времени.

Вводя обозначения для эффективных темпов роста факторов производства

$$\delta = \frac{1}{K} \frac{dK}{dt}, \quad \nu = \nu' + \frac{1}{L} \frac{dL}{dt}, \quad \eta = \eta' + \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \quad (33)$$

и используя технологические переменные (32), переписываем соотношения (28) и (31) в виде

$$\bar{\lambda} = \frac{\nu + \mu}{\delta + \mu}, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{\eta + \mu}{\delta + \mu}. \quad (34)$$

Коэффициент обесценивания  $\mu$  может быть исключен из уравнений (34), после чего находим соотношение между эффективными темпами роста различных производственных факторов

$$\delta = \nu + \alpha (\eta - \nu), \quad \alpha = \frac{1 - \bar{\lambda}}{\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda}}. \quad (35)$$

Это соотношение приобретает нетривиальный смысл, поскольку появляющееся в этом соотношении величина – технологический индекс  $\alpha$  оказывается включенной в производственную функцию и может быть оценена независимо.

## 4.6 Закон производства стоимости

В силу изложенных выше обстоятельств рыночную оценку стоимости произведённых продуктов следует считать функцией трёх производственных факторов

$$Y = Y(K, L, P).$$

Эту общую зависимость нужно привести к форме, которая должна быть совместимой с технологическим описанием процесса производства в предыдущем разделе. Поскольку мы имеем соотношение (35) между темпами роста факторов производства, то переменные  $K$ ,  $L$  и  $P$  должны быть взаимосвязанными: только два из аргументов производственной функции независимы. Технологическое описание предполагает, что следует рассматривать энергозатраты и трудозатраты как замещающие друг друга, а количество производственного оборудования, универсально измеренного его стоимостью  $K$ , следует считать комплементарным к работе ( $L$  и  $P$ ) производственного оборудования. Все это вынуждает нас записать производственную функцию в форме двух альтернативных линий

$$Y = \begin{cases} Y(K) \\ Y(L, P) \end{cases}, \quad dY - \Delta dt = \begin{cases} \xi(K) dK \\ \beta(L, P) dL + \gamma(L, P) dP \end{cases}, \quad (36)$$

где  $\Delta dt$  - часть приращения производства стоимости, которая связана с изменением характеристик производственной системы (технологические и структурные изменения). В соответствии с существующей практикой, величины  $\xi$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  могут быть названы предельными производительностями соответствующих факторов производства. В случае, если производственная система остается неизменной, интерпретация предельных производительностей оказывается простой: величина  $\xi$  соответствует стоимости, произведенной добавленной единицей капитала; предельные производительности  $\beta$  и  $\gamma$  определяют стоимость, произведенной единицей трудозатрат при постоянном потреблении энергии и единицей энергии при постоянных трудозатратах, соответственно.

Мы должны полагать, что все предельные производительности неотрицательны. Производственные факторы используются для того, чтобы создать полезные предметы потребления, и увеличение любого производственного фактора должно приводить к увеличению производства вещей – это утверждение известно как принцип продуктивности.

#### 4.6.1 *Технология и принцип продуктивности*

Используя уравнения для факторов производства (28) и (31), при  $\nu' = 0$  и  $\eta' = 0$ , можно переписать соотношения (36) для производства стоимости

в форме

$$\frac{dY}{dt} - \Delta = \begin{cases} \xi (I - \mu K) \\ (\beta \lambda + \gamma \varepsilon) I - \mu (\beta L + \gamma P) \end{cases} \quad (37)$$

Правые части этих уравнений равны друг другу, так что, в силу произвольности инвестиций  $I$ , можно записать соотношения для предельных производительностей

$$\beta = \xi \frac{\bar{\varepsilon} - 1}{\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda}} \frac{K}{L}, \quad \gamma = \xi \frac{1 - \bar{\lambda}}{\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda}} \frac{K}{P} \quad (38)$$

Если технологические коэффициенты  $\bar{\lambda}$  и  $\bar{\varepsilon}$  принимают произвольные значения, то из соотношений (38) следует, что одна из предельных производительностей, но не обе, могут быть отрицательной. Можно видеть, что, если выполняются соотношения

$$\bar{\lambda} < 1 < \bar{\varepsilon} \quad \text{or} \quad \bar{\lambda} > 1 > \bar{\varepsilon},$$

то предельные производительности являются неотрицательными, так что записанные соотношения можно рассматривать как формулировку принципа продуктивности.

#### 4.6.2 Аппроксимация производственной функции

Теперь, мы можем сформулировать простое приближение для производственной функции и предельных производительностей. Учитывая, что описание должно быть справедливым для любой начальной точки отсчёта времени (принцип универсальности), и предполагая также, что производство является гомогенным, то есть закон производства стоимости не меняется при изменении масштаба производства, записываем производственную функцию, как степенную функцию

$$Y = Y_0 \frac{L}{L_0} \left( \frac{L_0 P}{L P_0} \right)^\alpha, \quad (39)$$

где  $L_0$  и  $P_0$  – значения трудозатрат и энергозатрат в базисном году, а  $\alpha$  – характеристика производственной системы, которая, как показано ниже, совпадает с технологическим индексом, введенным уравнением (35).

Действительно, соотношение (39) определяет выражения, как для предельных производительностей, так и для вклада от изменения производственной системы непосредственно

$$\beta = Y_0 \frac{1 - \alpha}{L_0} \left( \frac{L_0 P}{L P_0} \right)^\alpha, \quad \gamma = Y_0 \frac{\alpha}{P_0} \left( \frac{L_0 P}{L P_0} \right)^{\alpha-1}, \quad \Delta = Y \ln \left( \frac{L_0 P}{L P_0} \right) \frac{d\alpha}{dt} \quad (40)$$



Сравнивая выражения (38) и (40) для предельных производительностей, находим

$$\xi = Y_0 \frac{L}{L_0 K} \left( \frac{L_0 P}{L P_0} \right)^\alpha, \quad \alpha = \frac{1 - \bar{\lambda}}{\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda}} \quad (41)$$

Таким образом, индекс  $\alpha$  в уравнении (39) и (40) есть технологический индекс, введенный уравнением (35). Принцип продуктивности ограничивает значения технологического индекса,  $0 < \alpha < 1$ . Кроме того, вся доступная информация о технологической активности может быть использована при оценке этой величины.

#### 4.6.3 Сравнение с эмпирикой

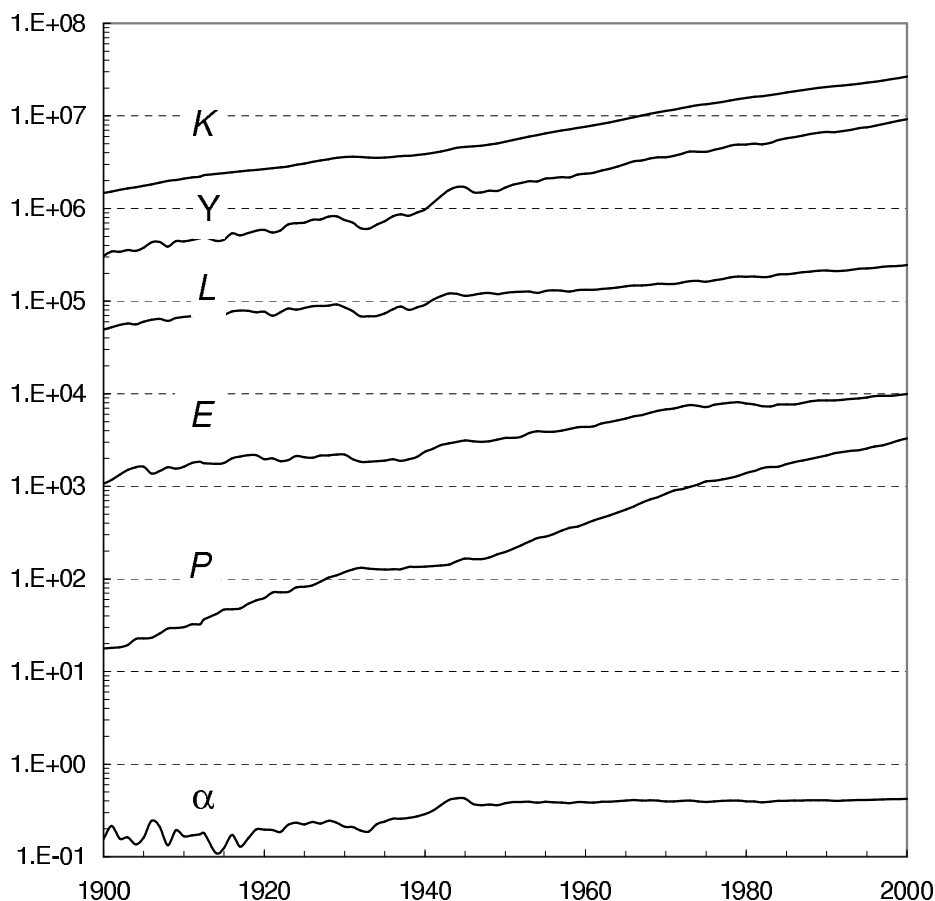
При простейшей схематизации, когда общественная производственная система рассматривается как совокупность производственных приспособлений (измеренная её стоимостью  $K$ ), получающих способность действовать при использовании труда  $L$  и производительной энергии  $P$ , производственная функция может быть определена в виде двух альтернативных линий

$$Y = \begin{cases} \xi K, & \xi > 0 \\ Y_0 \frac{L}{L_0} \left( \frac{L_0 P}{L P_0} \right)^\alpha, & 0 < \alpha < 1 \end{cases} \quad (42)$$

Эта формула представляет два дополнительных описания процесса производства стоимости: первая линия в формуле (42) напоминает нам о подходе Хэрода и Домара [62 - 65], в то время как функция во второй линии совпадает с производственной функцией Кобба-Дугласа (29), в который замещающая работа  $P$  стоит вместо основного капитала  $K$ . Первая линия связывает выпуск со стоимостью производственного оборудования (основной капитал), вторая описывает процесс производства через свойства оборудования привлекать труд и энергию к производству. Можно отметить также, что в традиционном неоклассическом подходе переменная "капитал" играет две различные роли: основной капитал как стоимость производственного оборудования и капитал как заместитель труда. Эти роли приписаны различным переменным в обсуждаемой теории: уравнение (42) содержит производительную энергию  $P$ , как услугу капитала и основной капитал  $K$  как меру количества производственного оборудования.

Для того чтобы проиллюстрировать согласованность теории с эмпирическими данными, было рассмотрено [59] развитие экономики США в 1890-2000

годы и использованы временные ряды для выпуска  $Y$ , капитала  $K$  и трудозатрат  $L$ , которые могут быть легко найдены на правительственных вебсайтах США. Данные собраны в Приложении работы [59]. Эмпирические



**Рисунок 4. Согласованное описание роста экономики США**

Рисунок показывает эмпирические оценки производства стоимости (валовой внутренний продукт)  $Y$ , миллионы долларов 1996 года; стоимости производственного оборудования (основной капитал)  $K$ , миллионы долларов 1996 года; затраты труда  $L$ , миллионы рабочих часов в год. Значения заменяющей работы (производительной энергии)  $P$ ,  $10^{16}$  джоулей за год, и технологический индекс  $\alpha$  были вычислены [59] в соответствии со значениями  $Y$ ,  $K$  и  $L$ . Показано также полное потребление первичных носителей энергии  $E$ ,  $10^{16}$  джоулей в год.

значения указанных величин показаны на рис. 4 вместе с оценкой полного количества первичных энергоносителей  $E$ , которое включает первичное производительное потребление энергии. Кроме указанных величин  $Y$ ,  $K$  и  $L$ , соотношения (42) включают две других переменные: производительную энергию  $P$  и технологический индекс  $\alpha$ , которые не могут иметь произвольные значения. Эти величины при заданных временных рядах величин  $Y$ ,  $K$  и  $L$  могут быть вычислены [59], оценки показаны на рис. 4. Вычисленные значения производительной энергии  $P$  совпадают с непосредственными эмпирическими оценками [66, 67]. Индекс  $\alpha$  также может быть оценен альтернативным способом: условие оптимального использования факторов производства позволяет нам установить отношение между параметром  $\alpha$  с одной стороны и затратами на использование факторов производства с другой [59]. Альтернативные способы вычислений обеспечивают надежность оценки технологического индекса.

Таким образом, показано, что производственная функция (42) обеспечивает последовательное описание прошлой эмпирической ситуации в течение многих лет 1900 - 2000, что даёт основание полагать возможность оценки будущих ситуаций. Конечно, при этом следует предвидеть будущие значения факторов производства и возможные изменения в системе самого производства, обозначаемыми изменениями технологического индекса  $\alpha$  вследствие технологических и структурных модификаций. Технологический индекс  $\alpha$  изменяется медленно и оказывается постоянным в течение десятилетий; как можно видеть на рис. 4, существенные изменения технологического индекса вызываются экстраординарными событиями, подобными Второй Мировой войне в годах 1940 - 45.

## 4.7 Инвестиции и изменение технологии

### 4.7.1 Инвестиции и три типа развития

Динамика производственных факторов определяется, согласно уравнениям (28) и (31), технологическими характеристиками системы и инвестициями. Для определения инвестиций заметим, что существуют некоторые ограничения при потреблении производственных факторов. Удобно обозначить через  $\tilde{\delta}$ ,  $\tilde{\nu}$  и  $\tilde{\eta}$  возможные (потенциальные) темпы роста факторов производства: капитала  $K$ , трудозатрат  $L$  и производительной энергии  $P$ , соответственно. Возрастание выпуска системы связано с возможностью привлечь дополнительные количества факторов производства, и можно допустить, что производственная

система стремится использовать все доступные ресурсы. Реализуемые инвестиции  $I$ , очевидно, определяются наименьшим потенциальным значением темпов роста производственных факторов, и потому возможны три типа развития производственной системы, как показано далее.

Чтобы определить инвестиции, следует принять во внимание ограничения, наложенные внутренними (дефицит наличной продукции и обеспечение необходимого уровня потребления) и внешними причинами (доступность труда и энергии). Очевидно, при предположении неограниченности труда и энергии потенциальный рост капитала ограничен неравенствами

$$-\mu < \tilde{\delta} < \frac{Y}{K} - \mu.$$

Другие ограничения могут появиться от недостатка труда и энергии. Мы предполагаем здесь, что существуют внешние источники труда и энергии, так что количества доступного труда  $\tilde{L}$  и энергии  $\tilde{P}$  известны. При заданных темпах потенциального роста  $\tilde{\nu}$  и  $\tilde{\eta}$  эти величины являются решениями уравнений

$$\frac{d\tilde{L}}{dt} = \tilde{\nu} \tilde{L}, \quad \frac{d\tilde{P}}{dt} = \tilde{\eta} \tilde{P}$$

Темпы потенциального роста  $\tilde{\nu}$  и  $\tilde{\eta}$  могут быть, в принципе, оценены из некоторых соображений, так что далее предполагаем, что темпы потенциального роста факторов производства известны как функции времени

$$\tilde{\delta} = \tilde{\delta}(t), \quad \tilde{\nu} = \tilde{\nu}(t), \quad \tilde{\eta} = \tilde{\eta}(t).$$

В любом случае темпы реального роста  $\delta$ ,  $\nu$  и  $\eta$  не превышает темпов потенциального роста  $\tilde{\delta}$ ,  $\tilde{\nu}$  и  $\tilde{\eta}$ , то есть

$$\delta \leq \tilde{\delta}, \quad \nu \leq \tilde{\nu}, \quad \eta \leq \tilde{\eta}.$$

Эти неравенства с помощью уравнений (28) и (31), содержащих темпы реального роста, определяют ограничения на инвестиции в производственный сектор

$$I \leq (\mu + \tilde{\delta})K, \quad I \leq \frac{\mu + \tilde{\nu}}{\lambda}L, \quad I \leq \frac{\mu + \tilde{\eta}}{\varepsilon}P. \quad (43)$$

Реальные инвестиции определяются конкуренцией между потенциальными инвестициями с одной стороны и доступностью труда и энергии с другой

стороны. В случае, когда производственная система стремится использовать все доступные факторы производства, следует записать для инвестиций

$$I = (\delta + \mu)K = \min \begin{cases} (\tilde{\delta} + \mu)K \\ (\tilde{\nu} + \mu)K/\bar{\lambda} \\ (\tilde{\eta} + \mu)K/\bar{\varepsilon} \end{cases} . \quad (44)$$

Темпы реального роста факторов производства  $\delta$ ,  $\nu$  и  $\eta$  отличаются от темпов потенциального роста. Согласно трем возможностям, записанным в уравнении (44), существует три способа экономического развития, для которых мы имеем различные формулы для вычисления. Как следует из уравнений (28) и (31), темпы реального роста факторов производства могут быть определены в трех случаях как

$$\begin{aligned} \delta &= \tilde{\delta}, & \nu &= (\tilde{\delta} + \mu)\bar{\lambda} - \mu, & \eta &= (\tilde{\delta} + \mu)\bar{\varepsilon} - \mu, \\ \delta &= (\tilde{\nu} + \mu)\frac{1}{\bar{\lambda}} - \mu, & \nu &= \tilde{\nu}, & \eta &= (\tilde{\nu} + \mu)\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\lambda}} - \mu, \\ \delta &= (\tilde{\eta} + \mu)\frac{1}{\bar{\varepsilon}} - \mu, & \nu &= (\tilde{\eta} + \mu)\frac{\bar{\lambda}}{\bar{\varepsilon}} - \mu, & \eta &= \tilde{\eta}. \end{aligned} \quad (45)$$

Первая строка уравнений приложима к случаю дефицита инвестиций и изобилию труда, энергии и сырья. Вторая строка действительна в случае дефицита труда, изобилия инвестиций, энергии и сырья. Последняя строка уравнений приложима к случаю дефицита энергии, изобилия инвестиции, труда и сырья.

#### 4.7.2 Принцип развития и безработица

Согласно вышеупомянутому утверждению, темпы реального роста производственных факторов не больше чем темпы потенциального роста. Если, действительно, производственная система стремится поглотить все доступные факторы производства, рост одного из факторов производства совпадает с потенциальным ростом. Это означает что разрыв между реальными и потенциальными значениями факторов производства, например, разрыв между наличной рабочей силой  $\tilde{L}$  и используемым трудом  $L$  может только увеличиваться. Таким образом, индекс безработицы  $u = (\tilde{L} - L)/\tilde{L}$ , например, не может

уменьшаться 'естественным' образом. Чтобы уменьшить разрыв между реальным и потенциальным величинами факторов производства, необходимо внешнее вмешательство, например, в виде правительственных инвестиций, и, принимая это во внимание, соотношение (44) следует переписать в форме

$$I = (\delta + \mu)K = \chi(u) K + \min \begin{cases} (\tilde{\delta} + \mu)K \\ (\tilde{\nu} + \mu)K/\bar{\lambda} \\ (\tilde{\eta} + \mu)K/\bar{\varepsilon} \end{cases}, \quad (46)$$

где величина  $\chi(u)$  введена для того, чтобы регулировать разрыв между предложением и спросом факторов производства, для чего должно быть зарезервировано некоторое количество инвестиций для регулирования. В этом случае, также существуют три способа экономического развития.

#### 4.7.3 Динамика технологических коэффициентов

Тот же самый принцип максимального использования доступных ресурсов помогает сформулировать уравнения для динамики технологических коэффициентов  $\bar{\lambda}$  и  $\bar{\varepsilon}$ . Чтобы выяснить закон временной зависимости технологических коэффициентов, обратимся опять к ограничениям на инвестиции. Соотношения (45) можно переписать как соотношения для безразмерных технологических величин  $\bar{\lambda}$ ,  $\bar{\varepsilon}$  и их отношения  $\Theta = \bar{\varepsilon}/\bar{\lambda}$

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{\tilde{\delta} + \mu}{\delta + \mu}, & \bar{\lambda} &\leq \frac{\tilde{\nu} + \mu}{\delta + \mu}, & \bar{\lambda} &\leq \frac{\tilde{\nu} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu}, & \bar{\varepsilon} &\leq \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\delta + \mu}, & \bar{\varepsilon} &\leq \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu}, \\ 1 &\leq \frac{\tilde{\delta} + \mu}{\delta + \mu}, & \bar{\lambda} &= \frac{\tilde{\nu} + \mu}{\delta + \mu}, & \bar{\lambda} &\geq \frac{\tilde{\nu} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu}, & \bar{\varepsilon} &\leq \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\delta + \mu}, & \Theta &\leq \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\nu} + \mu}, \\ 1 &\leq \frac{\tilde{\delta} + \mu}{\delta + \mu}, & \bar{\lambda} &\leq \frac{\tilde{\nu} + \mu}{\delta + \mu}, & \bar{\varepsilon} &= \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\delta + \mu}, & \bar{\varepsilon} &\geq \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu}, & \Theta &\geq \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\nu} + \mu}. \end{aligned} \quad (47)$$

В первом случае, есть внутренние ограничения роста. В последних двух строках, ограничен один из факторов производства,  $L$  или  $P$ .

Можно предположить, что существуют внутренние изменения технологии, которые приводят к изменениям технологических коэффициентов при

стремлении экономической системы использовать все доступные ресурсы. Это означает, что технологические коэффициенты имеют тенденцию изменяться таким способом, что неравенства в условиях (47) стремятся превратиться в равенства. Эти процессы связаны с распространением известных технологий. Можно считать, что скорости изменения технологических коэффициентов

$$\frac{d\Theta}{dt}, \quad \frac{d\bar{\lambda}}{dt}, \quad \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt}$$

являются функциями разностей

$$\Theta - \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\nu} + \mu}, \quad \bar{\lambda} - \frac{\tilde{\nu} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu}, \quad \bar{\varepsilon} - \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu}.$$

Эти тенденции технологических изменений в первом приближении могут быть описаны уравнениями для безразмерных величин

$$\frac{d\Theta}{dt} = -\frac{1}{\tau_\theta} \left( \Theta - \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\nu} + \mu} \right), \quad (48)$$

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dt} = -\frac{1}{\tau_\lambda} \left( \bar{\lambda} - \frac{\tilde{\nu} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu} \right), \quad (49)$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = -\frac{1}{\tau_\varepsilon} \left( \bar{\varepsilon} - \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu} \right). \quad (50)$$

Так как  $\Theta = \bar{\varepsilon}/\bar{\lambda}$ , то только два из уравнений (48) - (50) оказываются независимыми. Для того, чтобы уравнения (48) - (50) были совместными, времена релаксации  $\tau_\lambda$  и  $\tau_\varepsilon$  должны быть приравнены друг к другу и быть связанными с временем релаксации  $\tau_\theta$ , то есть

$$\tau_\lambda = \tau_\varepsilon = \frac{1}{\bar{\lambda}} \frac{\tilde{\nu} + \mu}{\tilde{\delta} + \mu} \tau_\theta.$$

Релаксационные уравнения (48) - (50) являются уравнениями первого порядка относительно величин, записанных в скобках, так что времена релаксации в этих уравнениях следует рассматривать в нулевом приближении. Это означает что в рассмотренном приближении, все времена релаксации равны друг другу, а именно,

$$\tau_\lambda = \tau_\varepsilon = \tau_\theta = \tau, \quad (51)$$

так что индексы в уравнениях (48) - (50) могут быть опущены в последующем изложении.

Легко видеть, что, если темпы роста производственных факторов постоянны, уравнение (48), например, при начальном значении

$$\Theta(0) = (1 - \Delta) \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\nu} + \mu}$$

имеет простое решение

$$\Theta(t) = \frac{\tilde{\eta} + \mu}{\tilde{\nu} + \mu} \left[ 1 - \Delta \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]. \quad (52)$$

Значение  $\tau$  является характерным временем перехода от одной технологической ситуации к другой, когда внешние параметры  $\tilde{\nu}$  и  $\tilde{\eta}$  изменяются. Этот процесс определяется внутренними процессами привлечения надлежащей технологии.

#### 4.7.4 Динамика технологического индекса

Теперь, можно непосредственно вычислить изменение технологического индекса

$$\alpha = \frac{1 - \bar{\lambda}}{\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda}}$$

в течение времени. Дифференцируя величину  $\alpha$  и используя уравнения (49) и (50), определяем соотношение

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\tilde{\delta} - \tilde{\nu} - \alpha(\tilde{\eta} - \tilde{\nu})}{\tau(\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda})(\tilde{\delta} + \mu)} \quad (53)$$

Чтобы определить изменение технологического индекса, следует сравнить темп потенциального роста капитала  $\tilde{\delta}$  с суммой темпов потенциального роста  $\tilde{\nu}$  и  $\alpha(\tilde{\eta} - \tilde{\nu})$ . Если первая величина больше чем вторая, технологический индекс растет. В установившейся ситуации технологический индекс постоянен (например, для США в послевоенные годы, см. рис. 4), так что справедливо соотношение

$$\tilde{\delta} = \tilde{\nu} + \alpha(\tilde{\eta} - \tilde{\nu}), \quad (54)$$

которое оказывается подобным отношению (35) для темпов реального роста факторов производства. В этом случае, технологический индекс



$\alpha$  оказывается первым интегралом эволюции системы. Можно ожидать, что существуют социальные механизмы, которые обеспечивают справедливость соотношения (54). Конечно, это соотношение следует рассматривать как приблизительное равенство, которое может быть нарушено беспорядками в общественной жизни.

#### 4.7.5 Принцип развития производства

Динамика производственных факторов определяется, согласно уравнениям (28) и (31), технологическими характеристиками системы и инвестициями, что подробно рассмотрено выше, так что система уравнений для динамики производственных факторов записывается в виде

$$\begin{aligned} \frac{dK}{dt} &= I - \mu K, & \frac{dL}{dt} &= \left( \bar{\lambda} \frac{I}{K} - \mu \right) L, & \frac{dP}{dt} &= \left( \bar{\varepsilon} \frac{I}{K} - \mu \right) P, \\ \frac{I}{K} &= \min \left\{ (\bar{\delta} + \mu), (\bar{\nu} + \mu) \frac{1}{\bar{\lambda}}, (\bar{\eta} + \mu) \frac{1}{\bar{\varepsilon}} \right\}, \\ \frac{d\bar{\lambda}}{dt} &= -\frac{1}{\tau} \left( \bar{\lambda} - \frac{\bar{\nu} + \mu}{\bar{\delta} + \mu} \right), & \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} &= -\frac{1}{\tau} \left( \bar{\varepsilon} - \frac{\bar{\eta} + \mu}{\bar{\delta} + \mu} \right), & \alpha &= \frac{1 - \bar{\lambda}}{\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda}} \end{aligned} \quad (55)$$

где  $\tau$  - время ввода производственного оборудования в действие, то есть, время перехода от одной технологической ситуации к другой.

Простейшая схематизация процесса производства позволяет нам сформулировать математическую модель, которая включает структурные и/или технологические изменения системы производства. Эта система устанавливает, что эволюция производственной системы, в конце концов, определяется темпами потенциального роста производственных факторов. Для оценки справедливости этого утверждения было рассмотрено [59] развитие народного хозяйства США в течение последнего столетия, причём темпы потенциального роста были заданы произвольно, несколько выше реальных темпов роста. Вычисления на основе уравнений (42) и (55) воспроизводят реальную динамику со спадами и всплесками выпуска, которые связаны со сменой типа развития: период с предельным использованием труда сменяется периодом с предельным использованием производительной энергии, что определяет малые циклы развития. Сценарии будущего развития могут быть рассмотрены, если определены будущие темпы потенциального роста, что является само по себе предметом непростого исследования.

Выполненное исследование [59] подтверждает, что траектория развития производственной системы действительно определяется стремлением системы

использовать все доступные ресурсы.<sup>8</sup> Это поведение системы является следствием суммы усилий многих предпринимателей, стремящихся получить наибольшую прибыль. Реальная траектория развития системы производства определяется доступностью труда и энергии. При этом остаётся ведущим принцип экономии живого труда: выигрывают те, кто заместил трудозатраты большей величиной работы машин. Однако закона экономии энергии не существует, по крайней мере, он остаётся в тени закона экономии живого труда. Энергию следует рассматривать как движущую силу производства; так или иначе, имеется сильная корреляция между выпуском продукции, с одной стороны, и производственным потреблением труда и энергии, с другой стороны.

## 4.8 Научно-технический прогресс и производительность труда

Наблюдаемый научно-технический прогресс сводится к процессам введения инноваций, то есть последовательной замене орудий, материалов, конструкций, приспособлений и прочего более совершенными с той или иной точки зрения образцами. Среди всех процессов замещения исключительную роль играет процесс замещения живого труда работой машин при содействии сил природы. Замещение усилий работающих работой машин является единственным процессом замещения, который влияет на производительность труда, определённого как отношение стоимости выпуска к трудозатратам

$$B = \frac{Y}{L}$$

Величина  $B$  есть та самая производительность труда, возрастание которой определяет смену одной общественной формации другой, более совершенной. Возрастание производительности труда невозможно понять без учёта явления, сопровождающего развитие производства, – привлечение сторонних источников энергии (домашние животные, ветер, вода, уголь, нефть и прочее) для выполнения хозяйственных работ, что замещает усилия человека в производстве. Эффект замещения полностью объясняет наблюдаемую динамику выпуска.

---

<sup>8</sup>Студентов экономики традиционно учат (см., например, [68]) принципу, по которому траектория развития определяется при выборе между потреблением и сбережением так, что потребление должно быть наибольшим в каждый момент времени. Возникают большие сомнения в справедливости этого принципа.

Чтобы найти уравнение для темпа роста производительности труда, продифференцируем записанное выше соотношение

$$\frac{1}{B} \frac{dB}{dt} = \frac{1}{Y} \frac{dY}{dt} - \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \alpha \left( \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} - \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} \right) + \frac{1}{\xi} \frac{d\xi}{dt},$$

и, используя уравнения (28) и (31), записываем

$$\frac{1}{B} \frac{dB}{dt} = \frac{(1 - \bar{\lambda})(\nu + \nu' + \mu)}{\bar{\lambda}} + \frac{(1 - \bar{\lambda})(\eta' - \nu')}{\bar{\varepsilon} - \bar{\lambda}} + \frac{1}{\xi} \frac{d\xi}{dt}. \quad (56)$$

В более простом случае, когда характеристики оборудования не изменяются после его установления, то есть,  $\nu' = 0$  и  $\eta' = 0$ , это выражение приобретает простой вид

$$\frac{1}{B} \frac{dB}{dt} = \frac{(1 - \bar{\lambda})(\nu + \mu)}{\bar{\lambda}} + \frac{1}{\xi} \frac{d\xi}{dt}. \quad (57)$$

В этом уравнении, кроме известного коэффициента амортизации  $\mu$ , присутствует безразмерная величина  $\bar{\lambda}$ , которая характеризует вводимую в производство технологию. Если  $\bar{\lambda} = 1$ , изменений в технологии не происходит, производительность труда постоянна, и все приращение продукта связано только с увеличением численности работающих. Человеческие усилия являются, конечно, главной движущей силой, но, при условии  $\bar{\lambda} < 1$  усилия работающих частично замещаются работой машин, движимых сторонними источниками энергии, в результате чего производительность труда увеличивается. Это общее описание влияния научного и технологического прогресса, которое естественным образом вписывается в картину развития человечества.

## 5 Динамика популяции и энергия

Можно найти множество слов и аргументов в литературе в пользу универсальной роли энергии в жизнедеятельности популяции человека [69 - 72]. П. Л. Капица [71] писал об этом, как об установившемся факте: "Общепризнанно, что основным фактором, определяющим развитие материальной культуры людей, является создание и использование источников энергии. Производимая ими работа теперь во много раз превосходит мускульную". Хотя для многих универсальная значимость энергии очевидна, спектр мнений относительно роли энергии в экономике остаётся широким, и нам следует присмотреться к роли энергии в производстве более внимательно.

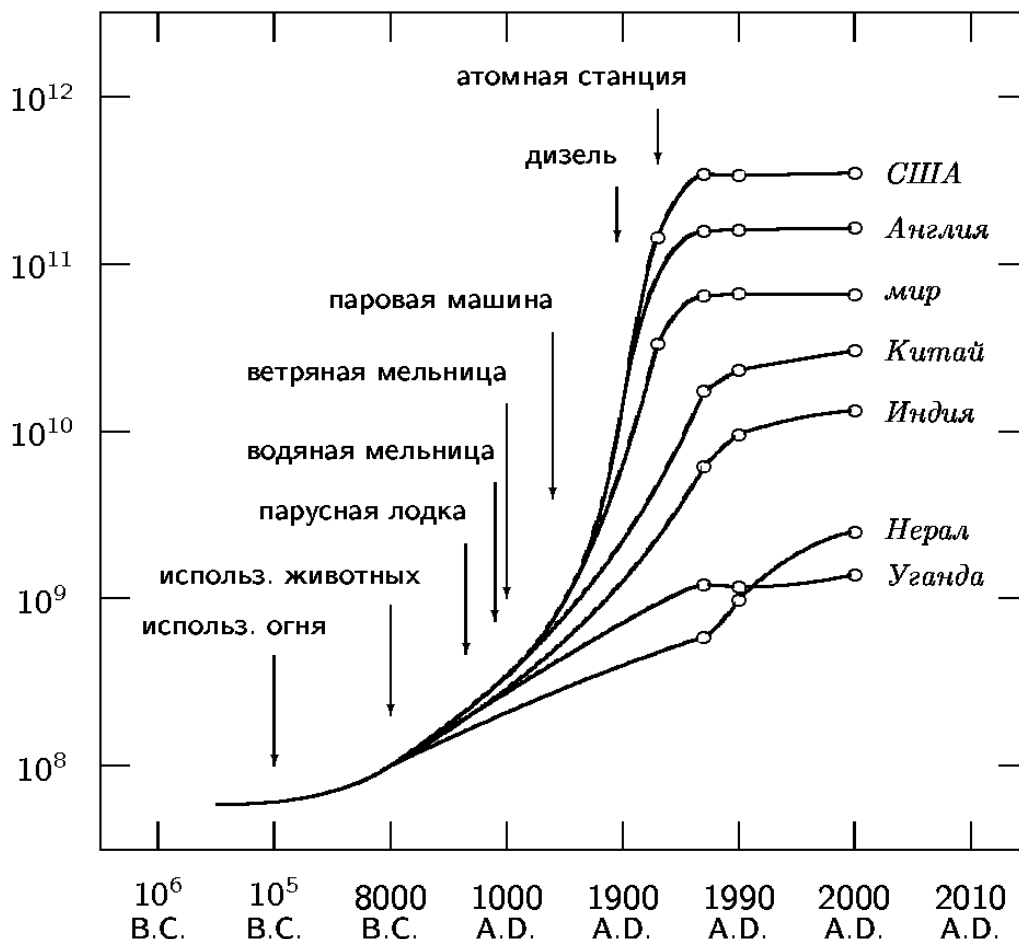
### 5.1 Два энергетических потока

Жизнь каждой биологической популяции основана на энергии, поступающей к популяции через пищу и организмы индивидуумов. Для популяции человека *биологически организованный поток энергии*, как можно оценить по данным [73], равен примерно  $4 \cdot 10^9$  джоулей в год на человека. Можно предполагать, что это значение оставалось примерно одинаковым во все времена существования человека.

Кроме того, что, как биологическая популяция, человек имеет естественный биологический механизм для извлечения энергии из окружающей среды, человек научился извлекать для себя энергию через производственную систему. Наряду с биологически организованными потоками энергии, человеческая популяция использует *общественно организованные потоки энергии*. Производственная система играет роль механизма, привлекающего энергию от разнообразных источников, среди которых остатки прежних биосфер: лес, уголь, нефть; прямая и косвенная солнечная энергия в форме потоков воздуха и воды; энергия расщепления и синтеза атомных ядер. Эта энергия через различные приспособления используются для преобразования веществ естественной окружающей среды в предметы искусственной окружающей среды, создавая полезную для людей сложность.

Величины общественно-организованного потока энергии из традиционных и коммерческих источников на душу населения для некоторых стран и для всего мира в целом показано на Рис. 5. Уже в течение сельскохозяйственной эры общественно-организованный поток энергии на душу населения достигает величины биологически организованного потока энергии ( $4 \cdot 10^9$  джоулей

$E/N$ , джоуль на человек в год



**Рисунок 5 Социально-организованный поток энергии**

Увеличение потребления энергии связано с изобретением все более и более сложных устройств для использования энергии (ветер, проточная вода, уголь, нефть и прочее). Числа, показанные пустыми кружечками, не включают работу животных, которые должны быть добавлены к потокам. Эта поправка существенна для Уганды и Непала, но может быть пренебрежена для других стран. Значения для точек взяты из ежегодного статистического сборника [74].

в год на человека). К середине девятнадцатого столетия величины двух потоков были приблизительно равны. В настоящее время, в развитых странах, общественно организованный поток энергии на душу населения в 50 - 100 раз превышает биологически организованный поток. В американской экономике, например, потребление первичной энергии приблизительно равно  $4 \times 10^{11}$  джоулей на человека ежегодно в 2000 году, что в 100 раз превышает биологически организованный поток энергии.

## 5.2 Работа и квази-работа в народном хозяйстве

Общественно организованный поток энергии начинается с идентификации первичных энергоносителей: уголь, нефть, потенциальная энергия падающей воды и прочее – это то, что человек находит в природе и что ничего не стоит, пока не придумано, как извлекать энергию из энергоносителей. Общее количество первичных энергоносителей, используемых человеком и оцененных в энергетических единицах, попадает в справочники, как величина использованной первичной энергии.<sup>9</sup>

Очевидно, что первичные энергоносители (для простоты говорят о потреблении первичной энергии  $E$ ) в общественном хозяйстве используются для различных целей. Так, например, 0.55 quad<sup>10</sup> нефтяных продуктов от общего количества приблизительно 97 quad первичной энергии, потреблённого в американской экономике в 1999 году, было использовано для дорожных покрытий. Ясно, что в этом случае важно не энергетическое содержание, но свойство нефтяных продуктов как определенных материалов.

Из общего количества первичных энергоносителей мы должны выделить ту часть, которая используется для приведения в действие различных приспособлений, замещающих трудовые усилия работой производственного оборудования. Эту величину называют *первичной производительной энергией*

---

<sup>9</sup>Сложилась традиция – говорить о потреблении энергии в народном хозяйстве. Ради точности, слово *потребление* должно быть заменено словом *преобразование*. Энергия не может быть *израсходована* в процессе производства, но может только быть преобразована в другие формы: химическая энергия в тепловую энергию, тепловая энергия в механическую энергию, механическая энергия в энергию тепловую и так далее. Для оценки количества возможного преобразования энергии (работы) используют эксергию (exergy).

<sup>10</sup>Удобно измерять огромные количества энергии специальной единицей *quad* (1 *quad*  $\approx 10^{18}$  *joules*), которая обычно используется американским Министерством энергетики (the US Department of Energy).

$E_p$ . Для иллюстрации, ниже перечислены некоторые усилия, которые заменяются работой промышленного оборудования [66]:

1. *Усилия по перемещению веществ и тел (включая собственные тела людей)* заменяла работа животных, ветра и паровых мобильных двигателей в прошлом. Теперь эти усилия заменяют главным образом работой самоходных машин – автомобилей, грузовиков, самолетов и других мобильных приспособлений.

2. *Усилия по преобразованию и разделению веществ и тел* – усилия в производстве одежды, инструментов, различных приборов и прочего – многие, если не все, изделия промышленности. Животные, ветер, вода и паровые машины использовались, чтобы совершать работу вместо людей в предыдущих столетиях. К середине двадцатого столетия, та же самая работа главным образом производится машинами с электроприводом.

3. *Усилия по наблюдению и координации, развитие принципов организации* рассматривали как специфически человеческие функции до последних лет. Теперь работу мозга заменяют работой информационных процессоров, которые оживляются электричеством.

Первичная производительная энергия  $E_p$  включает как истинную работу замещения или *производительную энергию*  $P$ , что действительно заменяет усилия работающих, так и энергию, рассеиваемую при производственных процессах. Коэффициент эффективности  $P/E_p$  зависит от используемой технологии и оказывается малой величиной. В Соединённых Штатах Америки в начале 60-х годов, например, как показывает анализ [59, 66, 67] при общем потреблении около  $5 \cdot 10^{19}$  джоулей около трети всей потребляемой энергии шло на замещение труда. При коэффициенте эффективности 0.01 истинная замещающая работа составляла около  $5 \cdot 10^{17}$  джоулей.

Остальная часть общественно-организованного потока энергии  $E - E_p$ , называемая квази-работой [67], используется непосредственно в производстве и домашних хозяйствах для освещения, нагревания, химических преобразований и других целей.

Заметим, что в экономических терминах, энергоносители являются *промежуточными продуктами*, которые вносят вклад в стоимость произведенных продуктов лишь прибавкой стоимости носителя к цене, играя в процессе производства стоимости совершенно такую же роль как любой другой промежуточный продукт, участвующий в производственном процессе. Однако, истинная работа замещения или *производительная энергия*  $P$  является созидающим стоимость *производственным фактором*, который следует рассматривать наряду с другим производственным фактором традиционной неоклассической экономики – затратами труда  $L$ .

### 5.3 О механизме привлечения энергии

Система уравнений, обсуждаемая в разделе 4.7.5, устанавливает, что эволюция производственной системы определяется, в конце концов, возможностью использовать дополнительные ресурсы, что формализуется заданием темпов потенциального роста производственных факторов  $\tilde{\nu}$  и  $\tilde{\eta}$ . В то время как предложение рабочей силы  $\tilde{L}$  может быть связано с численностью населения, которое, можно полагать, является резервуаром, откуда черпается рабочая сила, возникает необходимость обсудить источники предложения производительной энергии  $\tilde{P}$ .

Можно предположить, что совокупность знаний об окружающем нас мире играет роль резервуара, откуда появляются предложения по использованию энергии в производстве. Действительно, можно найти большое количество блестящих примеров 'преобразования' знаний в способы использования энергии в истории технологии. В качестве примера, можно указать изобретение паровой машины или двигателя внутреннего сгорания. Чтобы использовать окружающие нас источники энергии в производстве, нужно идентифицировать доступные источники энергии и сконструировать оборудование, которое использует энергию для производства. Определённые приспособления должны быть изобретены, изготовлены и установлены для работы, так что наличие производительной энергии определено фундаментальными результатами науки, исследованиями, проектными работами, и материализацией всего человеческого воображения о том, как использовать энергию для производства. Человеческое воображение обеспечивает методы использования энергии в производственных целях. Таким образом, основы предложений использования энергии в производственных целях лежат в депозите знаний, которые являются бесполезными, пока не используются в производственных процессах. Накопленные знания определяют возможность общества использовать энергию и привлекать дополнительную энергию к производству.

Хотя бесспорно, что знание делает энергию доступной для людей, остаётся вопрос, можно ли описать эту зависимость количественно. Мы знаем, что существует деятельность, производящая принципы организации, проектирование технологических процессов и т. д., то есть в широком смысле знания. Мы полагаем что этот депозит знаний является фундаментальным результатом науки, результатом исследования, проектных работ и прочих наблюдений. Запас знаний может быть измерен непосредственно в натуральных единицах, то есть, числом патентов, числом технических журналов, числом книг в печати и так далее [75]. Альтернативно, запас знаний может быть



оценен по усилиям, затраченным на его создание, то есть стоимостью, как и любого другого продукта. Может ли стоимость запаса знания, быть мерой информации, которая содержится во всем этом запасе? Запас знания должен рассматриваться как ресурс непосредственно. Существует ли какая-либо функция, описывающая зависимость предложение энергии от запаса знаний, и, если существует, каково её асимптотическое поведение? Можно думать что текущее внимание к запасам знаний, как к истинному источнику экономического роста [76 - 78] (см. также учебники: [45 - 46]), не случайно и может помочь решить проблему. Введение запаса знаний, как существенного фактора производства и подлинного источника экономического роста соответствует введению производительной энергии как фактора производства.

#### 5.4 Принцип развития

Изучение биологических популяций и экосистем дало основание для утверждения, что те популяции и их ассоциации (экосистемы), способные извлекать большее количество энергии из окружающей среды, имеют преимущество для выживания [24, 53, 79].

Популяция человека не является исключением. Можно утверждать, что *энергетический принцип развития*, который назван Горвардом Одумом [53] принципом максимальной мощности, является также справедливым для популяции человека с учётом того, что популяция человека использует два потока энергии. Действительно, исследование функционирования производства показывает [59] (см. раздел 4.7.5) что принцип, по которому развивается производство может быть сформулирован как принцип максимального поглощения доступных ресурсов. Фактически этот принцип развития является энергетическим принципом развития, сформулированным Лотка [24], Печуркиным [79], Одумом [51, р. 20): траектория развития системы определяется стремлением системы использовать наибольшее количество доступной энергии. Всё большее количество энергии используется человеческой популяцией через усовершенствования технологии.

Предшествующая история человечества подтверждает справедливость энергетического принципа развития. Обладание огромным количеством энергии позволяет человеческой популяции выживать во всех климатических зонах Земли и распространиться по всему земному шару. Кроме того, как можно видеть из истории человечества, нации, которые обладали методами использования доступной энергии, приобретали преимущество

перед другими нациями. Можно обратиться к классическим примерам: индустриальная революция и процветание Великобритании начались со времени изобретения паровой машины, которая позволила в большом количестве использовать химическую энергию, хранящуюся в угольных запасах. Мировая история может быть написана как история борьбы за контроль над потоками энергии.

## 6 Заключение: Перспективы роста

Статья продолжает традицию рассмотрения развития человеческой популяции как явления, доступного естественнонаучному анализу, особенностью которого является установление связей явлений. До дифференциации наук это был естественный метод рассмотрения, которому следовал и Мальтус, как один из родоначальников этой традиции в демографии, и Маркс, как один из родоначальников современной науки об обществе.<sup>11</sup>

Основной вывод исследований последних десятилетий заключается в том, что экономический механизм утилизации энергии человеком естественно входит в теорию общественного развития. Включение энергии в рассмотрение помогает избавиться от некоторых трудностей в теории производства стоимости и предлагает некоторое согласование контрастирующих точек зрения на роль энергии в общественном развитии. Понимание роли энергии в экономических процессах позволяют нам развить метод вычисления "энергетического содержания денежной единицы"[57], что важно для объективного описания финансовых, денежных потоков.

В простейшем приближении задача о росте популяции человека сводится к задаче о совместном росте численности населения и производственной системы. Рост численности населения  $N$  определяется соотношением (2) с зависящим от общественного богатства  $W$  коэффициентом рождаемости-смертности, который в простейшем приближении может быть аппроксимирован уравнением (18). Скорость роста популяции изменяется с увеличением

---

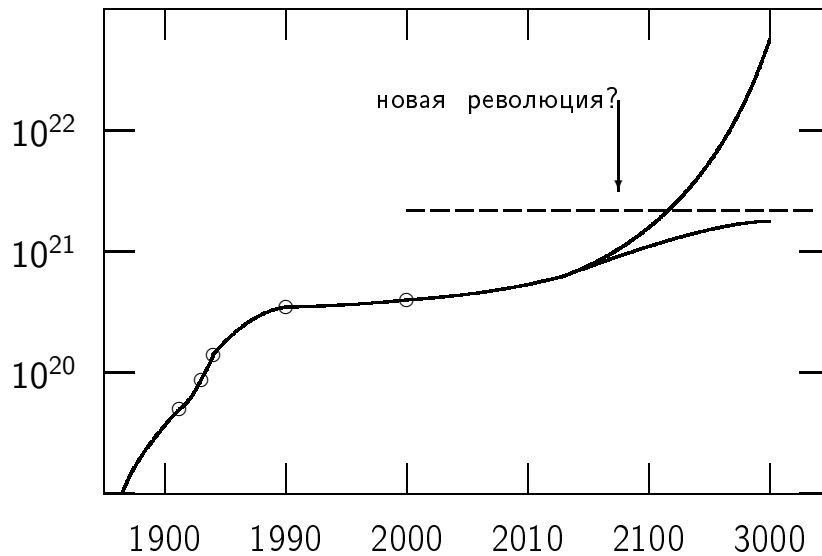
<sup>11</sup>По свидетельству авторов учебника "Экономикс"[35, стр. 4], Маркс, наряду со Смитом и Кейнсом, остаётся одним из наиболее влиятельных авторов, сформировавшим современную науку об общественном хозяйстве. По общественным опросам Маркс остаётся до сих пор одним из самых влиятельных мыслителей. Британская радиовещательная корпорация (ВВС) выясняла, кого можно считать величайшим философом всех времён и народов, и в результате на первом месте оказался Карл Маркс (The Sunday Times, June 19, 2005, Karl Marx takes lead in BBC poll of philosophers).

богатства  $W$ , но рост богатства определяется участием человека в экономическом процессе как производителя и потребителя. Возрастание общественного богатства  $W$  по уравнению (27) зависит от результатов деятельности производственной системы  $Y$ , которые, по уравнению (39), определяются двумя факторами производства: трудом  $L$  и производительной энергией  $P$ , в то время как динамика производственных факторов определяется по уравнениям (55). Развитие системы производства, в конечном счете, определяется ростом обеспеченности рабочей силой и возможностями привлечения дополнительного количества сторонней энергии, что определяется двумя важными величинами: темпами возможного роста труда и энергии, а именно,  $\tilde{\nu}(t)$  и  $\tilde{\eta}(t)$ . Эти величины должны быть заданы как экзогенные функции времени в теории производства, хотя, фактически, они являются эндогенными величинами в проблеме развития человеческой популяции, как самоорганизующейся системы.

Обратим ещё раз внимание, что хотя простейшее приближение определяет корректно общую тенденцию развития, описание деталей развития требует введения "структурных" переменных [10, 11, 22]. Особенности развития локальных популяций находят своё объяснение при использовании переменных, связанные с выделением элиты общества и соответствующим распределением богатства. Модели с такого рода переменными лежат в основе структурно-демографической теории общества [10, 11, 22], которая может быть использована для построения сценариев будущего развития популяции человека. Любопытно, что на основе новой методологии, по-видимому, возможна переформулировка учения Карла Маркса о классовой борьбе.

В любом случае, при естественном развитии популяции человека на Земле могут возникнуть ограничения, поскольку для роста популяции необходимо пространство, вещество и энергия. Первое ограничение может быть связано с доступной энергией. Предполагают, что глобальное потребление первичных энергоресурсов увеличится в два - пять раз к 2100 году и составит около  $10^{21}$ , что только примерно в тысячу раз меньше чем количество энергии, получаемой Землей от Солнца, которое равно  $3 \cdot 10^{24}$  джоулей ежегодно. Потребление ископаемого топлива будет возрастать более медленно, чем суммарные энергетические потребности, и популяция будет вынуждена, по-видимому, стремиться к освоению новых источников энергии. Можем мы получить энергию непосредственно от Солнца, или мы можем найти новые источники энергии? Очевидно, не может возникнуть никакого вопроса о нехватке энергии. Может лишь возникнуть вопрос о

$E$ , джоуль в год

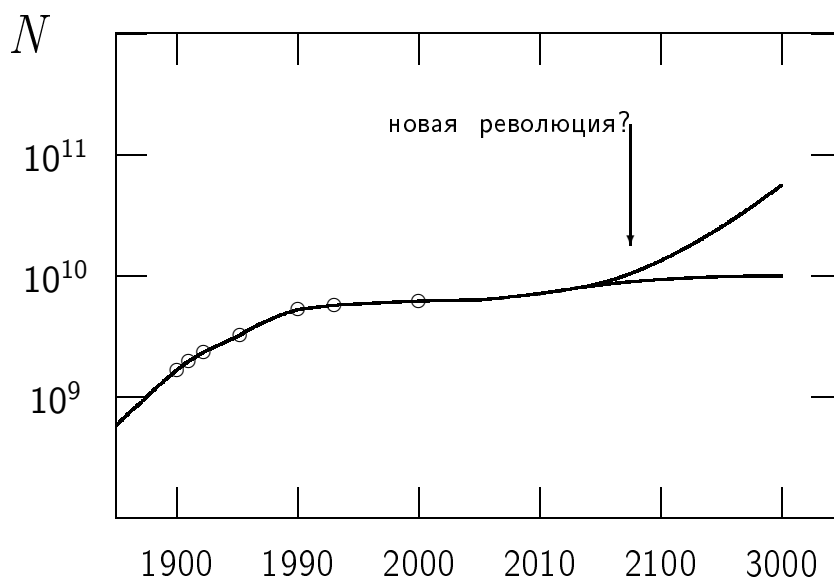


**Рисунок 6. Доступность энергии: будущее**

Пунктирная линия изображает значения энергии доступной от Солнца при коэффициенте использования  $10^{-3}$ .

способе использования энергии для получения желаемого эффекта. Этот вопрос, очевидно, связан с другим вопросом: ограничен ли запас знаний? Возможные сценарии развития изображены на рис.6. Может оказаться, что недостаток доступной энергии будет сдерживать амбициозные проекты популяции человека.

Другое ограничение связано с ограниченностью ареала обитания популяции. Теория производства, которую рассматривают как теорию производства стоимости, традиционно игнорировала движение веществ, рассматривая запасы сырья неисчерпаемыми и окружающую среду неограниченной и способной поглотить и элиминировать все отбросы и загрязнения. Никакие ограничения из-за доступности материальных ресурсов (руды, строительные материалы, угли, сырая нефть и сет) и из-за неспособности естественной окружающей среды принять отбросы и загрязнение не принимались во внимание. Эти предположения были разумны при небольшом масштабе индустриального производства. Однако в будущем рост популяции человека может быть ограничен пределами Земли непосредственно, и исследователи



**Рисунок 7. Рост населения Земли: будущее**

полагают, что ограничения, наложенные окружающей средой не могут быть игнорированы теперь, когда, из-за расширяющегося производства, Земля становится неприятным и, местами, вредным местом для проживания.

Однако, в конце концов, человечество, как самоорганизующаяся система, само проектирует своё собственное будущее, люди разработают принципы своего поведения, чтобы обеспечить выживание, и мы можем лишь вообразить, на основе всего того, что мы знаем, варианты будущего развития человеческой популяции и рассматривать это как эмпирическую экстраполяцию, которая позволяет нам вообразать различные сценарии роста, два из которых изображены на рис. 7. Будет ли рост ограничен, или же человечество найдет новые возможности?

Заметим, что понимание надлежащей роли энергии в экономических процессах открывает путь к физической интерпретации социальных явлений. Теория общественного развития сближается с термодинамическим подходом, имеющим универсальное применение [80 - 82]. Конечно, нет необходимости сводить понятие стоимости, как фундаментального понятия экономики, к каким-либо другим понятиям, но, поскольку процесс производства может рассматриваться как процесс преобразования 'диких' форм природы в формы полезные для людей (главным образом без изменения внутренней

энергии), то напрашиваются аналогии с термодинамическими понятиями. Вся нашу окружающую среду можно рассматривать как термодинамическую систему, и производственная общественная система, выполняя работу по преобразованию форм природной материи, уменьшает энтропию окружающей среды, так, что стоимость может быть сопоставлена энтропии с обратным знаком (см. также работу [61]). В термодинамической интерпретации, поток информации и работы, в конечном счете, определяет новую организацию вещества, которое приобретает формы различных предметов потребления (сложность), посредством чего процессы производства можно рассматривать как процессы материализации информации, стоимостью которой является работа системы производства. Должным образом организованная работа производственной системы необходима, чтобы преобразовать естественную окружающую среду в искусственную окружающую среду. При этом реализуются процессы, которые приводят не только к уменьшению энтропии, но и к её увеличению. Однако значение процессов диссипации не нужно преувеличивать, как делают некоторые исследователи [83], не замечая созидательной роли производственной системы, приводящей к уменьшению энтропии (см. критическое обсуждение в [84]).

## 7 Литература

1. Капица С. П. Феноменологическая теория роста населения Земли. Успехи физических наук, том 166(1), стр. 63 - 80 (1996).
2. А.В. Молчанов, Развитие теории С.П. Капицы. Гипотеза сети сознания. Санкт-Петербург, 2006. <http://avmol51.narod.ru/index.html#s1>
3. Malthus, T. Robert (1798). An Essay on the Principle of Population. As it affects the future improvement of society with remarks on the speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and other writers.
4. Kremer M. 1993. Population growth and technological change: One million B.C. to 1990. The Quarterly Journal of Economics 108: 681-716.
5. Barlow, R. (1994), Population growth and economic growth: Some more correlation, *Population and Development Review*, vol. 20 (1), pp. 153-165.
6. Gilland, B. (1995), World population, economic growth, and energy demand, 1990-2100: A review of projections', *Population and Development Review*, vol. 21 (3), pp. 507-539.
7. Pokrovski V.N. Physical Principles in the Theory of Economic Growth. Ashgate, Aldershot, 1999.<sup>12</sup>
8. Подлазов А.В. (A.V.Podlazov). (2001) Основное уравнение теоретической демографии и модель глобального демографического перехода (Master Equation of the Theoretical Demography and a Model of the Global Demographic Transition  
Preprint, Inst. Appl. Math., the Russian Academy of Science) ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

---

<sup>12</sup>Пересмотренный и расширенный вариант монографии готовится к изданию как "Введение в экодинамику. Размышления о первоисточниках богатства: экономика сталкивается с физикой". С содержанием и предварительными текстами глав на английском и русском языке можно ознакомиться на сайте "Экодинамика": <http://ecodynamics.narod.ru/production/contentp.html>.

9. Turchin, P. 2003c. *Historical Dynamics: Why States Rise and Fall*. Princeton University Press, Princeton, NJ. Расширенный перевод: Турчин, П. В. 2007. *Историческая динамика: На пути к теоретической истории*. М.: УРСС.
10. Коротаев А.В., Малков А.С., Халтурина Д.А. (A.V.Korotaev, A.S.Malkov, D.A.Khalturina) 2005. Математическая модель роста населения Земли, экономики, технологии и образования (Mathematical model of population growth, economics, technology and education Preprint, Inst. Appl. Math., the Russian Academy of Science).
11. Нефедов С. А. Концепция демографических циклов. Екатеринбург: Издательство УГГУ, 2007. - 141 с.
12. Weidlich Wolfgang, *Sociodynamics. A Systematic Approach to Mathematical Modelling in the Social Sciences* Harwood Academic Publishers, Amsterdam, 2000. Перевод: Вольфганг Вайдлих. Социодинамика: системный подход к математическому моделированию в социальных науках. Издание 2-е, стереотипное. Едиториал УРСС, Москва, 2005.
13. Mithen, Steven and Melissa Reed. (2002), Stepping out: a computer simulation of hominid dispersal from Africa, *Journal of Human Evolution*, vol. 43, pp. 433-462.
14. Luigi Luca Cavalli-Sforza. *Genes, peoples and languages*. Penguin, 2000, 240 pp.
15. Horner von S.J. Population explosion and interstellar expansion // J. British Interplanet. Soc. 1975. Vol.28. P. 691
16. Carr-Saunders, A.M. (1936), *World Population: Past Growth and Present Trends*, Oxford University Press, London.
17. Clark C. (1968), *Population Growth and Land Use*, Macmillan, London etc.
18. Durand, J.D. (1977), Historical estimates of World population: An evaluation, *Population and Development Review*, vol. 3 (3), pp. 253-269.
19. *World Population Projections, 1992 - 93 Edition* (1992), John Hopkins University Press for the World Bank, Baltimore and London.



20. Verhulst, P.F. (1838), Notice sur la loi que la population suit Dans son accroissement, *Corr. Math. Et Phys.*, vol. 10, pp. 113 - 121.
21. R. Pearl, The growth of populations, *Quarterly Review of Biology*, 2, 532 (1927).
22. Коротчаев, А. В., Комарова Н. Л., Халтурина Д. А. Законы истории. Вековые циклы и тысячелетние тренды. Демография, экономика, войны. 2-е изд. М.: УРСС, 2007.
23. Turchin, P. 2009. Long-term population cycles in human societies. Pages 1-17 in R. S. Ostfeld and W. H. Schlesinger, editors. *The Year in Ecology and Conservation Biology*, 2009. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1162. Перевод: Долгосрочные колебания численности населения в исторических обществах. <http://elementy.ru/lib/430806>
24. Lotka A.J. (1925), *Elements of Physical Biology*, Williams and Wilkins, Baltimore.
25. Volterra, V. (1931), *Lessons sur la mathematique de la lutte pour la Vie*, Marcel Brelot, Paris.
26. Murray, J.D. (1989), *Mathematical Biology*, Springer-Verlag, Berlin etc.
27. Alfred Sauvy. General Theory of Population. Translated from the French edition (Paris, 1966) by Christophe Campos. Basic Books, New York, 1969. xii + 556 pp., illus. Перевод: Сови А. Общая теория населения. М.: Прогресс, 1977.
28. С.В. Цирель (2003), О феноменологической теории роста населения Земли С.П. Капицы. Демоскоп Weekly, № 139 - 140, 15 - 31 декабря 2003. <http://www.demoscope.ru/weekly/2003/0139/analit02.php>
29. Ю.В. Шишков (2005), Демографические похождения физика // *Общественные науки и современность*. 2005. № 2. С. 156-161. Текст можно найти на <http://www.avmol51.narod.ru/Shishkov/d.htm>
30. Leontief, W.W. (1986), *Input-Output Economics, 2nd Ed.*, Oxford University Press, New York, Oxford.
31. А.Н. Усов, Что такое стоимость. <http://www.usoff.narod.ru/Us4.htm>

32. Aristotle, (about 350 B.C.E), *Nicomachean Ethics*,  
<http://classics.mit.edu/Aristotle/nicomachaen.5.v.html>
33. К. Маркс, *Капитал. Критика Политической Экономии*. Том первый, в: Карл Маркс и Фридрих Энгельс, *Сочинения*, издание второе, том 23, Государственное Издательство Политической Литературы, Москва, 1960.
34. M. Blaug, *Economic Theory in Retrospect*, 5th Ed., Cambridge University Press, Cambridge etc., 1997.
35. Samuelson, P. and Nordhaus W. (1989), *Economics, thirteenth edition*, McGraw-Hill Book Compony, New York et cetera.
36. П.Л.Капица, Научная деятельность Вениамина Франклина, *Успехи физических наук*, 58 (2), 169 (1956) или в *Эксперимент, теория, практика. Статьи и выступления*, Издательство Наука Главная редакция физико-математической литературы, Москва 1974, стр. 184 - 198.
37. Franklin, Benjamin, *A Modest Enquiry into the Nature and Necessity of a Paper-Currency*, Philadelphia, 1729. Electronic Text Center, University of Virginia Library. <http://etext.lib.virginia.edu/modeng/modengB.browse.html>
38. G.W. Cobb, P.N. Douglas, *A theory of production*, *American Economic Review*, Suppl. (1928) 139-165.
39. J. Robinson, *The production function and the theory of capital*. *Review of Economic Studies* 1954; 21 (2), 81-106.
40. J. Robinson, *The accumulation of capital*. Macmillan, London, 1956.
41. J. Robinson, *The measure of capital: the end of the controversy*, *Economic Journal* 81 (323) (1971) 597 - 602.
42. R. Solow, *Technical change and the aggregate production function*, *Review of Economic Studies* 39 (1957) 312-330.
43. D.W. Jorgenson, Z. Griliches, *The explanation of productivity change*, *Review of Economic Studies* 34 (3)( 1967) 249 - 283.

44. D.W. Jorgenson, K. Stiroh, Raising the speed limit: U.S. economic growth in the information age, *Brookings Papers on Economic Activity* 1 (2000) 125-211.
45. R.J. Barro, X. Sala-i-Martin, *Economic Growth*, McGraw-Hill, Boston, Mass., 1995.
46. Ph. Aghion, P.W. Howitt, *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press, Cambridge, Mass., 1998.
47. F. Soddy, *Cartesian economics: the bearing of physical sciences upon state stewardship*, Hendersons, London, 1924.
48. R. Costanza, Embodied energy and economic valuation, *Science*, 210 (1980) 1219-1224.
49. C.J. Cleveland, R. Costanza, C.A.S. Hall, R.K. Kaufmann, Energy and the US economy: A biophysical perspective, *Science*, 255 (1984) 890-897.
50. R. Kümmel, The impact of energy on industrial growth, *Energy* 7 (2) (1982) 189-203.
51. Cleveland CJ, Kaufmann RK, Stern DI. The aggregation of energy and materials in economic indicators of sustainability: thermodynamic, biophysical, and economic approaches. In: Ulgiati S, editor. *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. Rome: MUSIS, 1998, p. 143 - 166.
52. B.C. Beaudreau, *Energy and organization: growth and distribution re-examined*, Greenwood Press, Westport, CT, 1998.
53. H.T. Odum, *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
54. A. Valero, Thermoeconomics as a conceptual basis for energy-ecological analysis. In: Ulgiati S, editor. *Advances in Energy Studies Workshop. Energy Flows in Ecology and Economy*. Porto Venere, Italy 1998. Rome: MUSIS, 1998. p. 415 - 444.

55. E. Sciubba, On the possibility of establishing a univocal and direct correlation between monetary price and physical value: The concept of extended exergy accounting. In: Ulgiati S, editor. *Advances in Energy Studies Workshop. Exploring supplies, constraints, and strategies*. Porto Venere, Italy 2000. Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2001. p. 617 - 633.
56. Mirowski Ph. Energy and energetics in economic theory: A review essay. *Journal of Economic Issues* 1988; 22 (4): 811-830.
57. Beaudreau, Bernard C. and Vladimir N. Pokrovskii, 2010. On the energy content of a money unit. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 389 (13), 2597 - 2606, 1 July 2010.
58. D.S.L. Cardwell, *Turning Points in Western Technology*. New York: Neale Watson, Science History Publications, 1972.
59. Pokrovski, V.N. (2003), Energy in the theory of production. *Energy - The International Journal*. Vol. 28 No 8, pp. 769-788.
60. Lietaer, Bernard. (2001) *The future of money. A new way to create wealth, work, and a wiser world*. Century, London.
61. Candeal JC, De Miguel JR, Induráin E, Mehta GB, Utility and entropy, *Economic Theory*, 17: 233 - 238 (2001).
62. R.F. Harrod, An essay in dynamic theory, *Economic Journal* 49 (1939) 14-23.
63. R.F. Harrod, *Towards a Dynamic Economics*, Macmillan, London, 1948.
64. E.D. Domar, Capital expansion, rate of growth and employment, *Econometrica* 14 (1946) 137-147.
65. E.D. Domar, Expansion and employment, *American Economic Review* 37 (1947) 343-355.
66. V.N. Pokrovski, Productive energy in the US economy, *Energy* 32 (5)(2007) 816-822.
67. R.U. Ayres, L.W. Ayres, B. Warr, Exergy, power and work in the US economy, 1900–1998, *Energy* 28 (2003) 219-273.

68. Blanchard OJ, Fisher S. Lectures on macroeconomics. Cambridge MA: MIT Press, 1989.
69. W.F. Cottrell, Energy and society: the relation between energy, social change and economic development, McGraw Hill, New York, 1955.
70. B.C. Beaudreau, Energy rent. A scientific theory of income distribution. New York, Lincoln, Shanghai: iUniverse, Inc., 2005.
71. П.Л.Капица, Энергия и физика, Успехи физических наук, 118 (2), 307 (1976)
72. П.Л.Капица, Глобальные проблемы и энергия, Успехи физических наук, 122 (2), 327 (1977)
73. J.P.W. Rivers and P.R. Payne, The Comparison of Energy Supply and energy Needs: A Critique of Energy Requirements. In: G.A. Harrison (ed), Energy and Effort, London: Taylor and Francis, 1982. pp. 85-105.
74. *Energy Statistics Yearbook* (2001 and previous issues), UN, New York.
75. Stephan, P.E. (1996), 'The economics of science', *Journal of Economic Literature*, vol.34 (3), pp. 1199-1235.
76. Lucas, R.E., Jr. (1988). 'On the Mechanics of Economic Development', *Journal of Monetary Economics*, vol. 22 (21), pp. 3-42
77. Romer, P.M. (1986), 'Increasing Returns and Long-Run Growth', *Journal of Political Economy*, vol. 94, pp. 1002-1037.
78. Romer, P.M. (1990), 'Endogenous Technological Change', *Journal of Political Economy*, vol. 98, pp. 71-102.
79. Печуркин, Н.С. (1982), *Энергетические аспекты надорганизменных систем*, Наука, Новосибирск.
80. Morowitz HJ. Energy flow in biology. Biological organisation as a problem in thermal physics. New York and London: Academic Press, 1968.
81. Nicolis G, Prigogine I. Self-organisation in non-equilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations. New York: John Wiley and Sons, 1977.

82. Prigogine I. From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences. New York: Freeman & Company, 1980.
83. Georgescu-Roegen N. The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge MA: Harvard University Press, 1971.
84. Ayres R U. Comments on Georgescu-Roegen, Ecological Economics 1997; 22: 285-287.