

# 1. МОДЕЛИ МИРОВОЙ И СТРАНОВОЙ ДИНАМИКИ

## 1.1. Моделирование влияния энергоресурсов на динамику мирового развития\*

Динамичный рост мировой экономики в XX столетии был обеспечен возможностью использовать легкодоступную и дешевую энергию органического ископаемого топлива – угля, нефти и газа. Нефть стала кровью современной экономики, основой функционирования транспортной системы, обеспечивающей непрерывный рост мировой торговли. Каменный уголь и природный газ используются для выработки электричества и тепла, а также для приготовления пищи. Все это так же важно для жизни современной цивилизации, как и глобальная транспортная сеть.

В книге [Хейнберг 2013: 228] указывается, что начиная с 1970 г. рецессии в экономике случаются, когда цены на нефть достигают интервала 80–85 долларов за баррель с учетом инфляции или когда совокупная стоимость нефти для государства становится равна 5,5 % от ВВП. В фундаментальной книге [Бушуев и др. 2013: 256] также отмечается, что допустимая доля затрат на покупку нефти в мировом ВВП должна быть в пределах 5 %. С другой стороны, нефтеемкость мировой экономики стабильно снижается как в развитых, так и в развивающихся странах. А это приводит к тому, что экономика легче приспосабливается к высоким ценам. Действительно, в настоящее время затраты мировой экономики на нефть находятся на уровне 5 % при ценах 100–110 долларов/баррель, тогда как в 1980 г. при таких же сравнительных ценах затраты были на уровне 7 % мирового ВВП [Там же: 50–51]. Утверждается также, что «возможности роста цен нефти» иссякают, как только доля расходов на энергию в ВВП превышает 10–11 % [Там же: 255]. С учетом уникальной роли нефтяного ресурса в экономике высокие цены на нефть не только сбивают спрос, они подрывают экономику в целом. Так было, например, в 1970-х гг. в ходе первого нефтяного

---

\* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

ценового шока 1973–1974 гг., вызванного четырехкратным повышением цен. Тогда доля затрат на потребление нефти в мировом ВВП выросла с 1 % до 4 %. Но в то время даже развитые государства не были готовы к перестройке своих экономик с расточительной модели энергопотребления к энергоэффективной модели. Результатом стал мировой экономический кризис 1975–1976 гг. Именно в это время в развитых странах была запущена масштабная программа по разработке и применению энергосберегающих технологий, а также повышения эффективности использования энергии конечными потребителями. Она дала очень быстрый и масштабный результат. Действительно, когда в 1979–1980 гг. произошел второй нефтяной ценовой шок, вызванный пятикратным повышением цен до 41 долларов/баррель, и доля затрат на потребление нефти подскочила до исторического максимума, превышающего 7 % от ВВП, мировая экономика выстояла. Спрос на нефть и соответственно цены на нефть начали снижаться, и последующие два десятилетия (1982–2002 гг.) цены на нефть колебались в комфортных для экономики пределах – 15–25 долларов/баррель, а доля затрат на нефть в мировом ВВП сохранялась на уровне 2 %. Однако затем в 2003 г. начался спекулятивный рост цен, что привело в 2008 г. к новому историческому максимуму – 147 долларов/баррель, а доля нефти в ВВП снова поднялась до 5 %. Тогда практически все развитые экономики стран ОЭСР рухнули. Спрос на нефть упал, что привело к резкому падению цен до 32 долларов/баррель уже к концу 2008 г. Затем цены на нефть поднялись и с середины 2009 г. по конец октября 2010 г. цена нефти марки Brent колебалась в диапазоне 70–90 долларов/баррель, который считался комфортным как для производителей, так и для потребителей нефти.

После мирового экономического кризиса 2008–2009 гг. страны – члены ОЭСР интенсифицировали практические меры по внедрению технологий, способствующих энергосбережению и повышению энергоэффективности производства. Так, например, с 2007 по 2010 г. они снизили потребление жидкого топлива с 49,5 до 45,4 млн баррелей в день. Но эта тенденция компенсируется ростом спроса со стороны развивающихся стран. В результате спрос на нефть стабилизировался. Последовавший затем в 2011 г. спекулятивный всплеск цен до 115–120 долларов/баррель показал, что это уже ложится неподъемным грузом на экономики большинства раз-

витых и развивающихся стран, сдерживая экономический рост. Именно тогда международное энергетическое агентство (МЭА) приняло решение о проведении ряда нефтяных интервенций из стратегических запасов, что снизило цены до 107,5 долларов/баррель для нефти марки Brent. С тех пор цены держатся в коридоре 100–110 долларов/баррель. Очевидно, что если нефть вновь подорожает до 120–130 долларов/баррель, то в развитых странах снова начнется рецессия.

Что же касается добычи нефти, она достигнет своего пика предположительно в 2020–2030-е гг. [Плакиркин 2012: 80–83], затем будет медленно снижаться в течение всего XXI в. Доказанные запасы нефти составляют 150–180 млрд т, притом что к 2006 г. уже было добыто около 152 млрд т [Велихов и др. 2008: 12]. Доказанные мировые запасы угля превышают 900 млрд т. При нынешнем уровне добычи человечеству их хватит более чем на 200 лет. Доказанные запасы газа составляют 180 трлн м<sup>3</sup>, тогда как до сегодняшнего времени во всем мире добыто около 90 трлн м<sup>3</sup>. Имеющихся запасов газа хватит на 100 лет [Там же].

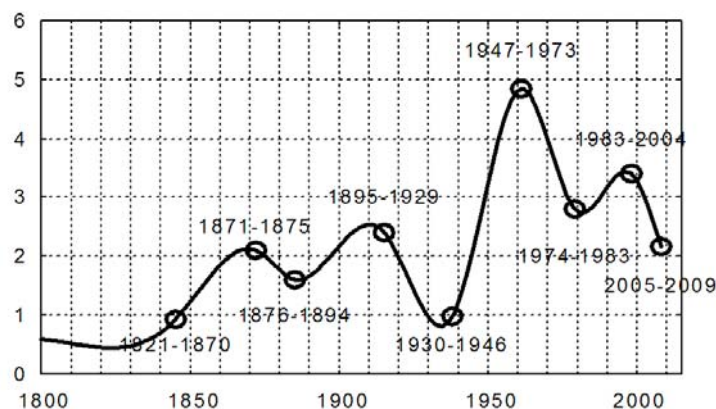
Смогут ли другие источники энергии заменить ископаемое органическое топливо? Вот какой ответ на этот вопрос дает уже упомянутый Р. Хейнберг: «Полная замена энергии, в настоящее время вырабатываемой из ископаемого топлива, энергией альтернативных источников, вероятно, невозможна в краткосрочной перспективе. Нереально ожидать этого даже в долгосрочной перспективе» [Хейнберг 2013: 162]. Действительно, эффективных заменителей нефтепродуктам сегодня и в ближайшие десятилетия не предвидится. Для того чтобы индустриальное общество могло успешно развиваться, ему нужны первичные источники энергии с минимальной энергетической рентабельностью 10:1. В свои лучшие времена нефть давала энергетическую рентабельность порядка 100:1, а, например, такой заменитель нефти, как биотопливо, имеет энергетическую рентабельность порядка 1:1 [Там же: 214]; поэтому оно может заменять нефть только в экстренных случаях, но не систематически.

Таким образом, ожидать падения спроса на нефть в обозримом будущем не приходится. Скорее всего, уровень потребления стабилизируется, вероятен даже локальный рост в случае ускорения экономического роста в ряде растущих экономик. Целью настоящей

работы является установление степени влияния на мировой экономический рост в XXI в. углеводородных ископаемых энергоресурсов, обусловленного именно фундаментальными факторами: издержками добычи, истощением и замещением. Мы не рассматриваем влияние спекулятивных факторов и последствий геополитических конфликтов и противостояний в мире.

### **1.1.1. Тенденция замедления темпов роста мировой экономики в период 5-го БЦК (1982–2018 гг.)**

Общеизвестно, что научно-технический прогресс является главным двигателем современного экономического развития. Лауреат Нобелевской премии по экономике Роберт Солоу убедительно доказал, что именно технический прогресс, реализуемый в инновациях, является основным источником экономического роста [Solow 1956]. Он показал, что более  $\frac{3}{4}$  темпов роста современной экономики имеют своим источником технический прогресс. Действительно, благодаря научно-технической революции, породившей эпохальные инновации, в XX в. были достигнуты невиданные темпы роста мировой экономики (рис. 1.1). В целом по миру среднегодовые темпы роста ВВП составили в 1948–1973 гг. 4,9 %. Мировой экономический кризис 1970-х гг., вызванный нефтяными шоками, привел к значительному спаду, среднегодовые темпы роста ВВП по миру в 1973–2001 гг. снизились до 3,1 %. Оправившись после кризиса 2001 г., мировая экономика вновь набрала темпы: в 2003–2007 гг. она росла в среднем на 3,6 % в год. Однако следует отметить, что это стало результатом бурного подъема растущих экономик стран БРИК. Кризис мировой финансовой и экономической системы, разразившийся в 2007–2008 гг., вновь привел к дальнейшему усилению тенденции глобального замедления экономического роста. Так, темп прироста мирового ВВП в 2013 г. составил всего 2,1 %, и это самый низкий показатель с 2009 г., когда завершилась острая фаза мирового финансового кризиса. В 2014 г. ожидается рост до 3 %. Таким образом, после былых рекордных показателей мировая экономика вступила в период замедления темпов роста, углубления и учащения кризисов, растущей неопределенности (см. рис. 1.1).



**Рис. 1.1.** Динамика относительных среднегодовых темпов роста мирового ВВП, 1800–2009 гг. (%)

Источники: [World Bank 2010; Maddison 2010].

Тогда же было показано, что это снижение темпов экономического роста связано с двумя причинами – снижением темпов научно-технического прогресса (НТП) и истощением природных ресурсов [Дубовский, Эйсмонт 1988]. В 1990-е гг. НТП вновь набрал нужные темпы, а с середины 2000-х гг. снова их сбавил, следуя циклической закономерности. Сегодня мир стоит на пороге новой технологической революции, обусловленной началом широкого использования конвергентных NBIC-технологий (нано-, био-, инфо- и когнитивных технологий), которые благодаря мощному синергетическому эффекту способны разогнать темпы технического прогресса в 2020–2030-е гг. до рекордных 3–3,5 % в год [Акаев 2014]. Что же касается влияния истощаемых природных ресурсов, и в особенности энергоресурсов, то оно в дальнейшем будет только усиливаться, по крайней мере, до тех пор, пока не будет найден эффективный альтернативный заменитель основного источника энергии – нефти. Большинство экспертов полагает, что это произойдет не ранее середины XXI в.

#### **1.1.2. Производственная функция Дубовского, учитывающая влияние истощаемых природных ресурсов**

В указанной работе [Дубовский, Эйсмонт 1988] было также показано, каким образом можно учесть в производственной функ-

ции (ПФ) искомое влияние истощаемых природных ресурсов (ИПР). В настоящее время нефть, газ и уголь используются преимущественно как топливо, и только около 5 % их общего объема поставляется в химическую промышленность. Однако, по прогнозам экспертов, к середине XXI в. в химической промышленности будет использоваться до 10 % добываемых углеводородов, а к концу века – до 30 %. Итак, если природный ресурс используется только в сфере производства ВВП, тогда справедлива ПФ [Дубовский, Эйсмонт 1988: 44]:

$$Y = F(K, L, R_C, A) - C_R R_C, \quad (1)$$

где ПФ  $F$  может быть интерпретирована как валовый выпуск экономики, включающей две отрасли: ресурсодобывающую и всю остальную часть экономики;  $K$  – основной производственный капитал;  $L$  – трудозатраты;  $A$  – технический прогресс. Причем  $R_C$  – поток первичных энергоресурсов, который выступает в производственном процессе как промежуточный продукт и исчезает в процессе производства, добавляя свою стоимость:  $P_R = C_R R_C$  ( $C_R$  – удельные издержки добычи ИПР) – к цене конечного продукта  $Y$ . С другой стороны, если ИПР не является фактором производства, а используется только в сфере конечного потребления, причем его потребление пропорционально ВВП, то есть  $R_C = a_R Y$ , где  $a_R$  – коэффициент ресурсоемкости ВВП, тогда ПФ примет вид [Там же: 49]:

$$Y = F(K, L, A) \exp(-a_R C_R). \quad (2)$$

ПФ (1) и (2) справедливы, если принимается следующая гипотеза о влиянии истощения природного ресурса на ВВП [Там же: 43]:

$$\frac{\partial Y}{\partial Q} = -R_{pr} \frac{\partial C_R}{\partial Q}, \quad (3)$$

где  $R_{pr}$  – поток добываемого природного ресурса;  $Q$  – кумулятивная величина добытого объема ИПР.

О. А. Эйсмонт подробно изучил проблему долгосрочного роста экономики, использующей природный ресурс, издержки добычи которого возрастают [Эйсмонт 1995]. Он показал, что издержки добычи ИПР зависят главным образом от их кумулятивной добычи, и привел следующие конкретные функции для их описания [Там же: 118]:

$$\text{а) для случая неограниченного ИПР: } C_R = C_{R0} \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^\eta; \quad (4)$$

$$\text{б) для ограниченного ИПР: } C_R = C_{R1} [(Q_* - Q_1)/(Q_* - Q)]^\delta, \quad (5)$$

где  $Q$  – кумулятивная величина всего добытого объема ИПР на текущий момент времени  $t$ ;  $Q_*$  – полный запас ИПР (до начала добычи) с учетом новых месторождений, открытых геологоразведкой;  $Q_0$  – суммарный объем ИПР, добытых с самого начала эксплуатации разведанных месторождений до определенного начального момента времени  $T_0$ ;  $Q_1$  – кумулятивный объем ИПР, добытых с начала эксплуатации разведанных месторождений до некоторого критического переходного момента  $T_1$ ;  $C_{R1}$  – издержки добычи ИПР в момент  $T_1$ ;  $\eta$  и  $\delta$  – постоянные параметры. Кумулятивный объем ( $Q$ ) добычи ИПР связан с его текущим потоком ( $R_C$ ) следующим образом:

$$Q = \int_{T_0}^T R_C(t) dt + Q_0; \quad Q_0 = \int_{-\infty}^{T_0} R_C(t) dt. \quad (6)$$

О. Эйсмонт приводит следующие оценки для значений параметров  $\eta$  и  $\delta$  в формулах (4) и (5) [Эйсмонт 1995]:  $\eta = 2$ ;  $\delta = 3$ . Причем последняя оценка справедлива начиная с момента  $T_1$ , когда:

$$\frac{Q_*}{Q_1} \leq 5. \quad (7)$$

С. В. Дубовский полагает, что в долгосрочном периоде больше подходит НТП по Харроду и записывает выражение (2) в следующем виде [Дубовский 2004: 9]:

$$Y = CK^{1-\alpha} (AL)^\alpha \exp(-\mu p_R a_R), \quad (8)$$

где  $p_R$  – рыночная цена добытого ИПР, включающая издержки добычи и ренту за истощение;  $\alpha$  – параметр (доля труда в ВВП);  $C$  и  $\mu$  – постоянные множители. Назовем ПФ в формуле (8) производственной функцией Дубовского. Рыночная цена добытого природного ресурса определяется выражением [Дубовский, Эйсмонт 1988: 44]:

$$p_R = p_r + C_R, \quad (9)$$

где  $p_r$  – цена ИПР в его естественном природном состоянии, представляет собой ренту за истощение, причем  $p_r = \frac{\partial Y}{\partial R_C}$ . Было пока-

зано [Дубовский, Эйсмонт 1988: 45], что в оптимальных условиях добычи ИПР динамика его рыночной цены будет подчиняться модифицированному уравнению Хотеллинга:

$$\frac{\dot{p}_R}{p_R} = \left( \frac{\partial Y}{\partial K} \right) \left( 1 - \frac{C_R}{p_R} \right). \quad (10)$$

Поскольку  $\frac{\partial Y}{\partial K}$  в оптимальном случае равна норме процента  $r$ , уравнение (10) можно записать в виде:

$$\frac{\dot{p}_R}{p_R} = r \left( 1 - \frac{C_R}{p_R} \right). \quad (11)$$

Подставляя формулу (9) в (11), получим уравнение для определения стоимости ренты:

$$\frac{\dot{p}_r}{p_r} = r - \frac{\dot{C}_R}{p_r}. \quad (12)$$

Так как  $\dot{C}_R = \frac{\partial C_R}{\partial Q} \frac{dQ}{dt}$ , если  $\frac{\partial C_R}{\partial Q} = 0$ , тогда  $\dot{C}_R = 0$ , и мы получаем из уравнения (12) классическое уравнение Хотеллинга [Hotelling 1931]:

$$\frac{\dot{p}_r}{p_r} = r; \quad p_r = p_{r0} e^{r(T-T_0)}. \quad (13)$$

Решая дифференциальное уравнение (11), получаем:

$$p_R = C_1 e^{rt} - e^{rt} \int r e^{-r\tau} C_R(\tau) d\tau. \quad (14)$$

Таким образом, зная функцию  $C_R(t)$  – издержки добычи, мы сможем рассчитать прогнозную динамику роста рыночных цен на ИПР по формуле (14). Но для того чтобы рассчитать  $C_R(t)$ , необходимо знать поток природных ресурсов ( $R_C$ ), используемых в



экономике. В дальнейшем, учитывая ключевую роль энергоресурсов в экономике и жизнедеятельности человека, ограничимся ископаемыми органическими топливными ресурсами – углем, нефтью и газом.

В отличие от производственной функции Дубовского (8), мы воспользуемся моделью экономического роста Г. Мэнкью, Д. Ромера и Д. Уэйла, учитывающей наряду с физическим капиталом также человеческий капитал [Mankiw, Romer, Weil 1992]:

$$Y(t) = K^\alpha(t)H^\beta(t)[A(t)L(t)]^{1-\alpha-\beta}. \quad (15)$$

В общем случае, учитывая ИПР, используемые в производственном процессе  $R_C$  (1) и в сфере конечного потребления  $R_f$  (2), ПФ (15) можно записать в виде:

$$Y^*(t) = K^\alpha(t)H^\beta(t)R_C^\gamma(t)[A(t)L(t)]^{1-\alpha-\beta-\gamma} \cdot \exp[-\mu a_R p_R]. \quad (16)$$

Эндогенизируя данную ПФ при условии, что справедливы соотношения  $Y \sim K$ ,  $Y \sim H$  и  $Y \sim R$ , из формулы (16) получаем:

$$Y^*(t) = \nu AN \exp\left[\frac{\mu a_R p_R}{1-\alpha-\beta-\gamma}\right]. \quad (17)$$

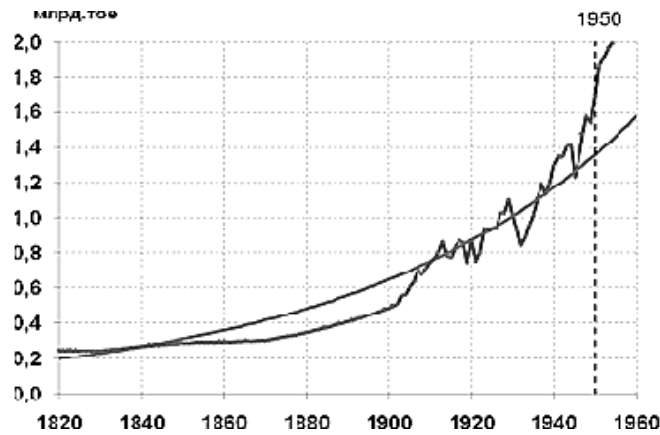
Отсюда непосредственно следует, что пока  $\gamma$  мало ( $\gamma \leq 0,05$ ), влияние энергоресурсов на ВВП также мало, но если оно превышает критическую величину, тогда это начинает сказываться.

### 1.1.3. Динамика мирового потребления энергоресурсов

Ю. А. Плакиткин установил следующую эмпирическую закономерность: начиная с 1800 г., то есть с начала промышленной революции, через каждые 45 лет наблюдалось удвоение среднегодового потребления первичных энергоресурсов [Плакиткин 2013: 119–120]. Однако это имело место до 1970-х гг., когда сменилась парадигма энергопотребления. До этого времени в мировой экономике использовали легкодоступную и дешевую энергию угля, нефти и газа. Поэтому энергия была основным мотором экономического роста. Она стала тормозить экономическое развитие только после нефтяных ценовых шоков 1970-х гг. Следовательно, на первом этапе индустриальной эпохи в период с 1800 по 1950 г. потребление может быть описано экспоненциальной функцией:

$$E = E_0 \exp[q_E(T - T_0)], \quad (18)$$

где  $E_0$  – количество первичной энергии, использованной человечеством в начале промышленной эпохи в 1820 г. ( $T_0=1820$  г.);  $E_0 = 0,2$  млрд т н. э. (тонн нефтяного эквивалента);  $q_E$  – темпы роста энергопотребления. Учитывая, что удвоение энергопотребления происходило каждые 45 лет, в соответствии с «правилом 72 лет», легко получаем, что  $q_E = \frac{72}{45} \cong 1,6\%$ , или  $q_E = 0,016$ .



**Рис. 1.2.** Динамика мирового энергопотребления до 1950 г.

График функции (18) представлен на рис. 1.2, наряду с кривой фактического роста мирового энергопотребления. Действительно, экспоненциальная кривая весьма удовлетворительно аппроксимирует фактическую кривую до 1950 г. Для этого периода запасы ископаемых органических видов топлива были еще неограниченными, поэтому справедлива формула (4) для издержки добычи. Следовательно, она будет иметь вид:

$$Q = \int_{T_0}^T E(t) dt + Q_0 = \int_{-\infty}^T E_0 \exp[q_E(t - T_0)] dt = \frac{E_0}{q_E} \exp[q_E(T - T_0)]. \quad (19)$$

Подставляя формулу (19) в (4), получаем:

$$C_R = C_{R0} \exp[2q_E(T - T_0)]. \quad (20)$$

Рассчитаем рыночную цену добытого топливного ресурса (14):

$$p_R = C_1 e^{rt} - e^{rt} \int r C_{R0} e^{-r\tau} e^{2q_E(\tau-T_0)} d\tau = C_1 e^{rt} - r C_{R0} \frac{e^{2q_E(T-T_0)}}{2q_E - r}. \quad (21)$$

В начальный момент времени ( $T = T_0$ ) отсюда следует уравнение:

$$p_{R0} = C_1 e^{rT_0} - r C_{R0} \frac{1}{2q_E - r}.$$

Решая данное уравнение относительно произвольной постоянной  $C_1$ , получаем:

$$C_1 = e^{-rT_0} \left[ p_{R0} + r C_{R0} \frac{1}{2q_E - r} \right]. \quad (22)$$

Подставив формулу (22) в (21), получим окончательную формулу для расчета рыночной цены добытого топливного ресурса:

$$p_R = p_{R0} e^{r(T-T_0)} \left\{ 1 + \frac{r C_{R0}}{p_{R0} (2q_E - r)} \left[ 1 - e^{(2q_E - r)(T-T_0)} \right] \right\}. \quad (23)$$

Если  $2q_E < r$  ( $r=0,07$ ), тогда  $e^{(2q_E - r)(T-T_0)}$  быстро убывает со временем, а если учесть, что  $p_{R0} \gg C_{R0}$ , для первого периода (1820–1950 гг.) получаем:

$$p_R \cong p_{R0} e^{r(T-T_0)}. \quad (24)$$

Действительно, на первом этапе индустриальной эпохи (1820–1950 гг.) издержки добычи были несравненно меньше, чем рентная плата, то есть  $p_R \gg C_R$ , тем более имело место неравенство  $p_{R0} \gg C_{R0}$ , принятое во внимание при получении формулы (24).

#### 1.1.4. Расчет динамики основных производственных факторов

Итак, подставляя формулу (24) в (17), получаем ПФ для расчета динамики ВВП с учетом влияния стоимости энергоресурсов:

$$Y^*(t) = \nu AN \exp \left[ - \frac{\mu a_R p_{r0}}{1 - \alpha - \beta - \gamma} e^{r(T-T_0)} \right]. \quad (25)$$

Поскольку мы рассматриваем влияние энергоресурсов на мировую экономику в целом, численность населения мира ( $N$ ) в предпо-

ложении устойчивого развития в XXI в. можно описать формулой Капицы [2008]:

$$N = K^2 \operatorname{arccctg} \left( \frac{T_K - T}{\tau} \right), \quad (26)$$

где  $K$  – число Капицы;  $T_K$  – год демографического перехода;  $\tau$  – характерное время жизни человека. Исходя из данных Мэддисона по численности населения мира [Maddison 2010], мы рассчитали следующие наилучшие оценки для значений параметров в формуле Капицы (26):  $K^2 = 3941$ ;  $T_K = 2002$  г.;  $\tau = 42,9$  лет ( $\cong 43$  года). Технический прогресс  $A(t)$  в первом приближении определяется из уравнения Кузнецца – Кремера [Kremer 1993]:

$$q_A = \frac{dA}{A dt} = vN, \quad v = \text{const}. \quad (27)$$

Решая данное уравнение с учетом (26), получаем:

$$A = C_2 \exp \left\{ v K^2 \tau \left[ \frac{T - T_K}{\tau} \operatorname{arccctg} \left( \frac{T_K - T}{\tau} \right) - \frac{1}{2} \ln \left\{ 1 + \left( \frac{T_K - T}{\tau} \right)^2 \right\} \right] \right\}, \quad (28)$$

где  $C_2$  – произвольная постоянная.

Данная формула (28) хорошо описывает динамику технического прогресса до 1950-х гг., когда влияние системы НИОКР было незначительным. В ходе и особенно после Второй мировой войны в развитых странах сформировалась мощная система НИОКР, которая вскоре превратилась в сферу производства инновационных технологий и продуктов, оказывающую существенное влияние на технический прогресс. Дополнительное ускорение технического прогресса, обусловленное сферой НИОКР, можно учесть с помощью НИОКР-моделей [Акаев и др. 2013: 30–38], добавляя к базисному темпу роста  $q_A$  (27), обусловленному технологиями широкого потребления, темпы роста, порождаемые инновационными технологиями из сферы НИОКР [Там же: 32]:

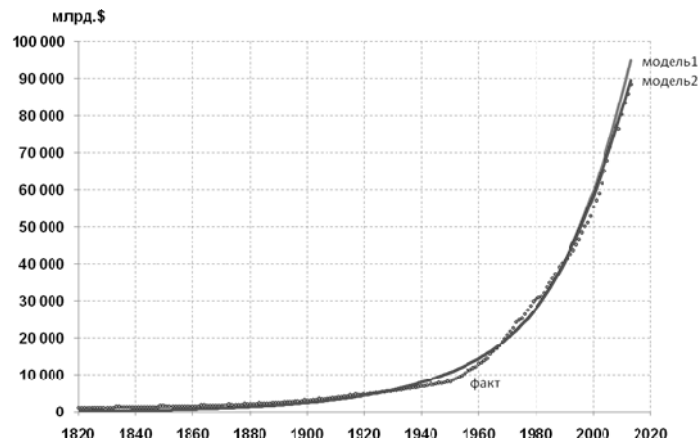
$$q_A^0 = a \left[ l_A^2 (3l_M - 2l_A) - l_{A0}^2 (3l_M - 2l_{A0}) \right], \quad (29)$$

где  $l_A(T - T_0) = \frac{l_{A0}(1 + l_{A1})}{1 + l_{A1} \exp[-\mathcal{G}_A(T - T_0)]}$ ;  $l_A = \frac{L_A}{L}$ ;  $l_A$  – относительная численность ученых и ИТР ( $L_A$ ), занятых в системе НИОКР;  $l_{A0}$  – доля занятых в НИОКР в начальный момент времени  $T_0$ ;  $l_M$  – максимальная величина доли занятых в системе НИОКР в режиме насыщения;  $l_{A1}$  и  $\mathcal{G}_A$  – параметры системы НИОКР, определяемые исходя из фактической численности ученых и ИТР, занятых в НИОКР;  $a$  – постоянный коэффициент.

Итак, учитывая формулу (29), получаем следующую окончательную формулу для расчета динамики технического прогресса  $A^*(t)$  как в XX столетии (28), так и в XXI в.:

$$A^*(t) = C_2 \exp \left\{ \varepsilon K^2 \tau \left[ \frac{T - T_K}{\tau} \operatorname{arccctg} \left( \frac{T_K - T}{\tau} \right) - \frac{1}{2} \ln \left\{ 1 + \left( \frac{T_K - T}{\tau} \right)^2 \right\} \right] \right\} + \left. + a \int_{T_0}^T [l_A^2(3l_M - 2l_A) - l_{A0}^2(3l_M - 2l_{A0})] dt \right\}. \quad (30)$$

Поскольку теперь нам известны все три переменных сомножителя (26) и (30) в ПФ (25), описывающей динамику мирового ВВП с учетом влияния энергоресурсов, мы сможем легко рассчитать траектории движения ВВП как без учета влияния энергоресурсов по укороченной ПФ  $Y^* = \nu' A^* N$  ( $\nu' = \nu C_2$ ) – модель 1, так и с учетом влияния энергоресурсов по полной ПФ (25) – модель 2. Расчеты по моделям 1 и 2 были проведены с начала индустриальной эпохи (1820 г.) до 2000-х гг., так как именно в 1990-е гг. произошел переход ископаемых органических топлив в разряд с ограниченным запасом, то есть от модели (4) к модели (5). Причем параметры  $\nu'$ ,  $\varepsilon$  и  $a$  находились исходя из требования наилучшего (в смысле среднеквадратичного отклонения) совпадения расчетных значений мирового ВВП с фактическими данными на протяжении 1820–1950 гг. В результате были получены следующие значения указанных коэффициентов:  $\nu' = 6,467$ ;  $\varepsilon K^2 \tau = 0,12$ ;  $a = 1,01$ . Затем отдельно осуществлялась оптимизация по параметру  $\mu$ . Результаты расчетов представлены на рис. 1.3.



**Рис. 1.3.** Моделирование динамики мирового ВВП в индустриальную эпоху (1820–2013 гг.)

Источник фактических данных: Maddison 2010; World Bank 2010.

Как видим из рассмотрения графиков, соответствующих моделям 1 и 2, они слегка начали расходиться лишь в последние десятилетия, когда цены на энергоносители стали ощутимо сказываться на экономическом развитии, а стоимость покупки энергоресурсов составила величину порядка 5 % мирового ВВП. Следует отметить, что траектория движения ВВП по модели 2, учитывающей влияние энергоресурсов, практически совпала с фактическими данными за последние десятилетия, демонстрируя тем самым эффект снижения размера ВВП вследствие подорожания нефти. Этот эффект легко рассчитать в процентном отношении от ВВП:

$$p_c = 100 \left\{ 1 - \exp[-\mu^* e^{r(T-T_0)}] \right\}, \quad (31)$$

где  $\mu^* = \frac{\mu a_R p_{r0}}{1 - \alpha - \beta - \gamma}$ . Расчеты показывают, что вплоть до 2008 г.

указанная величина не превышала 5 % ВВП. Все это свидетельствует о высокой точности предложенных моделей (25) и (30).

#### 1.1.5. Новая парадигма энергопотребления

Прежде чем переходить к рассмотрению влияния энергоресурсов на экономический рост в условиях новой парадигмы энергопотребления [Акаев 2012], приведем оценки запасов органического иско-

паемого топлива. В книге [Велихов и др. 2008: 12] приводятся данные о доказанных, но еще не добытых мировых запасах энергоресурсов:

**угля** – 320 млрд т н. э. + около 40 млрд т н. э. еще не разведанных потенциальных запасов;

**нефти** – 150–180 млрд т + около 120 млрд т еще не разведанных прогнозных запасов;

**газа** – 150–180 млрд т н. э. + около 50 млрд т н. э. еще не разведанных потенциальных запасов.

Таким образом, в сумме потенциальные запасы углеводородных энергоресурсов с учетом как доказанных, так и еще не разведанных прогнозных, составляют около 860 млрд т н. э. С другой стороны, в работе А. Э. Конторовича и А. Г. Коржубаева находим следующие данные о глобальном потреблении первичных энергоресурсов [Конторович, Коржубаев 2008: 243].

1. Начиная с конца палеолита до начала XX в. общее потребление энергоресурсов можно оценить величиной 40 млрд т н. э.

2. За период с 1901 по 1970 г. общее потребление энергоресурсов составило 124 млрд т н. э.

3. За период с 1970 по 2007 г. было потреблено уже 291 млрд т н. э.

Как видим, суммарное потребление энергоресурсов в мире за 1970–2007 гг. намного превысило объем их использования за весь предшествующий период развития человеческой цивилизации. Отсюда получаем приближенную оценку суммарного потребления энергоресурсов за всю историю человечества до 2007 г. – это примерно 455 млрд т н. э. Если же считать до 1970 г., тогда оценка составит 164 млрд т н. э. Поскольку потенциальные запасы составляют на сегодня 860 млрд т н. э., то общий запас органических ископаемых видов топлива ( $Q_*$ ) изначально был равен примерно 1315 млрд т н. э.

Следовательно, соотношение  $\frac{Q_*}{Q_1}$  в функции (5) в 1970 г. равнялось

приблизительно 8, а в 2007 г. – приблизительно 3. Подчеркнем, что на данном и последующем этапах ключевую роль играют уже издержки добычи, они превалируют над рентными платежами, то есть в формуле (9)  $C_R \gg p_r$  и поэтому  $p_R \cong C_R$ . Значит, уже

в этот период, несколько ближе к 1990-м гг., стало справедливо неравенство (7), а следовательно, и соотношение (5), где  $\delta = 3$ :

$$P_R \cong C_R = C_{R0} \left( \frac{860 \cdot 10^9}{1315 \cdot 10^9 - Q} \right)^3.$$

Если расчеты по данной формуле проводить после 2007 г., тогда ее можно записать в виде:

$$P_R \cong C_R = \frac{C_{R0}}{\left(1 - \frac{Q^*}{Q_\Sigma}\right)^3}; \quad Q_\Sigma = 860 \cdot 10^9 \text{ т н. э.}, \quad (32)$$

причем  $Q^*$  – кумулятивный объем добычи органического ископаемого топлива начиная с 2008 г.

В работе [Плаkitкин 2013] было показано, что на глобальном уровне уже произошел переход к новой парадигме энергопотребления, которая выражается в стабилизации душевого энергопотребления на уровне приблизительно 1,8 т н. э./чел. год. Следовательно, общий объем энергии  $E$ , употребляемой человечеством ежегодно, теперь составляет:  $E = 1,8N$  т н. э./год. Поскольку динамика численности населения мира описывается формулой Капицы (26), для XXI в. имеем:

$$E = 1,8K^2 \operatorname{arcctg} \left( \frac{T_K - T}{\tau} \right). \quad (33)$$

Теперь можем рассчитать кумулятивный объем потребляемой энергии на глобальном уровне:

$$\begin{aligned} Q^* &= \int_{T_1}^T E(t) dt = \int_{T_1}^T 1,8K^2 \operatorname{arcctg} \left( \frac{T_K - T}{\tau} \right) dt = \\ &= 1,8K^2 \left\{ (T - T_K) \operatorname{arcctg} \left( \frac{T_K - T}{\tau} \right) + \frac{\tau}{2} \ln \frac{\tau^2 + (T_K - T_1)^2}{\tau^2 + (T_K - T)^2} + \right. \\ &\quad \left. + (T_K - T_1) \operatorname{arcctg} \left( \frac{T_K - T_1}{\tau} \right) \right\} \end{aligned} \quad (34)$$

где  $T_1$  – момент перехода от неограниченных запасов ископаемого органического топлива к ограниченному истощаемым.



Однако в формулы (33) и (34) входят все источники энергии, поэтому нам необходимо выделить среди них только органические ископаемые виды топлива. Это легко сделать, умножая уравнение (32) на коэффициент, учитывающий замещение органических видов топлива другими источниками энергии, например ВИЭ и т. п. [Акаев 2012: 444]:

$$e_C = 0,92 \left\{ 1 - \frac{d \exp[k(T - T_C)]}{1 + d \{ \exp[k(T - T_C)] - 1 \}} \right\}, \quad (35)$$

где  $T_C = 1990$  г., когда началось осязаемое использование ВИЭ и биотоплива;  $d$  и  $k$  – параметры, причем  $d = 0,05$ ;  $k = 0,012$ . Следовательно, энергия, генерируемая органическими ископаемыми источниками, запишется в виде (см. формулы 33 и 35):

$$E_C = 1,656 K^2 \left\{ 1 - \frac{d \exp[k(T - T_C)]}{1 + d \{ \exp[k(T - T_C)] - 1 \}} \right\} \operatorname{arccctg} \left( \frac{T_K - T}{\tau} \right). \quad (36)$$

Далее, чтобы получить кумулятивный объем энергии от органических видов топлива, остается ввести численный расчет интеграла:

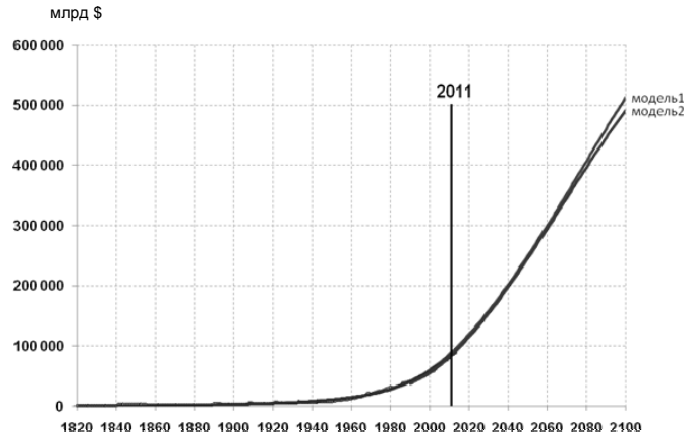
$$Q_C^* = \int_{T_1}^T E_C(t) dt. \quad (37)$$

Таким образом, начиная с 1990-х гг. вместо ПФ (25) для расчета динамики ВВП необходимо пользоваться ПФ:

$$Y^*(t) = \nu AN \exp \left[ - \frac{\mu a_R C_R}{1 - \alpha - \beta - \gamma} \right], \quad (38)$$

где  $C_R = \frac{C_{R0}}{\left( 1 - \frac{Q_C^*}{Q_\Sigma} \right)^3}$ ;  $Q_C^*$  – вычисляется по формуле (37). Здесь

также учтено, что  $p_R \cong C_R$ .



**Рис. 1.4.** Прогноз динамики мирового ВВП в XXI в.

На рис. 1.4 представлены прогнозные графики движения мирового ВВП, рассчитанные по усеченной ПФ ( $Y^* = \nu AN$ ) – модель 1, а также по полной ПФ (37) с учетом влияния энергоресурсов – модель 2. Наилучшее приближение ПФ (37) с фактическими данными

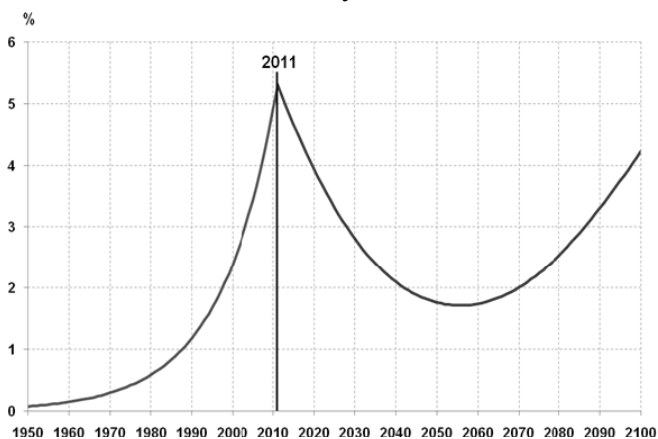
на этапе с  $T_C = 1990$  г. по 2013 г. дало:  $\frac{\mu a_R C_{R0}}{1 - \alpha - \beta - \gamma} = 0,0987$ . Как

видим из рис. 1.4, прогнозные траектории движения ВВП начинают расходиться только к концу XXI в. Разница между этими траекториями представляет собой стоимость покупки энергоресурсов, которую в процентном соотношении к ВВП можно рассчитать по формуле:

$$p_C = 100 \left\{ 1 - \exp \left[ -\mu^* \frac{1}{\left(1 - \frac{Q_C^*}{Q_\Sigma}\right)^3} \right] \right\}. \quad (39)$$

Стоимость органических ископаемых энергоресурсов, определяемая фундаментальными причинами, рассчитана по формуле (31) для докризисного периода, то есть до 2008 г., а также по формуле (38) для посткризисного периода – до конца XXI в. Соответствующие графики представлены на рис. 10; как видим, нигде стоимость органических ископаемых энергоресурсов не выходит за пределы критических 5 %, если не считать 2010–2011 гг., когда ощущались

последствия гигантского всплеска цен на нефть в 2008 г. Более того, вплоть до 1990 г. стоимость органических видов топлива находилась в пределах весьма комфортного 1 % ВВП, так что нефтяные ценовые шоки 1970-х гг. были исключительно политическим явлением, а ценовой шок 2008 г. – спекулятивным.



**Рис. 1.5.** Доля стоимости энергоресурсов в мировом ВВП

Из рис. 1.5 также видно, что стоимость органических ископаемых видов топлива будет снижаться вплоть до 2050-х гг., когда наступит пик добычи углеводородных видов топлива, а затем будет плавно повышаться, оставаясь до конца столетия в пределах допустимых 5 %. Отметим, что все это сбудется только при условии, что замещение углеводородных источников энергии будет продолжаться темпами, определяемыми логистическим законом (35).

Таким образом, расчет долгосрочного влияния углеводородных ископаемых энергоресурсов на мировой экономический рост в XXI в. с использованием производственной функции Дубовского, учитывающей влияние истощаемых природных ресурсов, показывает, что доля затрат на потребление углеводородных энергоресурсов, обусловленная фундаментальными факторами, не превысит допустимых 5 % от мирового ВВП в течение всего XXI в. Всплески затрат на покупку углеводородных энергоресурсов, выходящие за пределы 5 % ВВП и тормозящие экономический рост вплоть до рецессии, обусловлены исключительно спекулятивными факторами, торговыми войнами или являются следствием геополитических конфликтов и противостояний.

## Литература

- Акаев А. А. 2012.** Стабилизация климата Земли в XXI веке путем перехода к новой парадигме энергопотребления. *ДАН* 446(4): 442–447.
- Акаев А. А. 2014.** У России немалые шансы создать новую индустрию. *Мир перемен* 1: 15–20.
- Акаев А. А., Садовничий В. А., Ануфриев И. Е. 2013.** Усовершенствованная НИОКР-модель для прогнозных расчетов совокупной производительности факторов экономического роста. *Мировая динамика: закономерности, тенденции, перспективы*. М.: ЛИБРОКОМ. С. 15–50.
- Бушуев В. В., Конопляник А. А., Миркин Я. М. 2013.** *Цены на нефть: анализ, тенденции, прогноз*. М.: ИД «Энергия».
- Велихов Е. П., Гагаринский А. Ю., Субботин С. А., Цибульский В. Ф. 2008.** *Эволюция энергетики в XXI веке*. М.: ИздАт.
- Дубовский С. В. 2004.** *Энергетика и распределение доходов в экономическом развитии. Математические модели*. М.: РОХОС.
- Дубовский С. В., Эйсмонт О. А. 1988.** Макроэкономическое моделирование с учетом эндогенного НТП и истощения природных ресурсов. *Системное моделирование: модели и методы*. Вып. 20. М.: ВНИИСИ. С. 36–46.
- Капица С. П. 2008.** *Очерк теории роста человечества. Демографическая революция и информационное общество*. М.: ЛЕНАНД.
- Конторович А. Э., Коржубаев А. Г. 2008.** Мировые тенденции потребления энергии в ретроспективе и перспективе. *Энергоэкологическое будущее цивилизации*. М.: МИСК. С. 242–258.
- Плакицкий Ю. А. 2012.** *Закономерности инновационного развития мировой экономики. Энергетические уклады XXI века*. СПб.: Реноме.
- Плакицкий Ю. А. 2013.** *Инновационно-технологическое развитие и его воздействие на вектор развития глобальной энергетики*. М.: Ред. ж-ла «Уголь».
- Хейнберг Р. 2013.** *Конец роста. Новая экономическая реальность*. М.: Книжный клуб «Книговек».
- Эйсмонт О. А. 1995.** Экономический рост при непостоянных издержках добычи природных ресурсов. *Экономика и математические методы* 31(4): 116–122.
- Hotelling H. 1931.** The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy* 39(2): 137–175.
- Kremer M. 1993.** Population Growth and Technological change: One Million B.C. to 1990. *The Quarterly Journal of Economics* 108(3): 684–716.
- Maddison A. 2010.** *World Population, GDP and Per Capita GDP, A.D.1 – 2003*. URL: [www.ggdc.net/maddison](http://www.ggdc.net/maddison).
- Mankiw G., Romer D., Weil D. 1992.** Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics* 107(2): 407–437.
- Solow R. 1956.** A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics* 70, February: 65–94.
- World Bank 2010.** *World Development Indicators*. Washington, DC: World Bank. URL: <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>.