ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2010, том 434, № 6, с. 749–755

ИНФОРМАТИКА

УДК 519.97

К ВОПРОСУ О ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРЕДЕЛАХ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА И ПОТРЕБЛЕНИЯ

© 2010 г. Иностранный член РАН А. А. Акаев

Поступило 30.11.2009 г.

Деннис Медоуз и его соратники в своей знаменитой книге "Пределы роста. 30 лет спустя" [1] снова подтверждают научно обоснованный вывод о том, что тенденции современного экономического и промышленного развития – это путь, ведущий к глобальному экологическому кризису. Вместе с тем они также убедительно показывают возможности для человечества, не останавливая экономического развития и не снижая уровня жизни в развитых странах, перейти к модели устойчивого развития.

Для устойчивого развития необходим устойчивый долговременный экономический рост, в особенности рост доходов на душу населения – именно он является главным фактором повышения уровня жизни и безопасности. Заслуга Д. Медоуза и его соратников состоит в том, что они на протяжении почти сорока лет непрерывно исследовали физические пределы роста, связанные с исчерпанием природных ресурсов и ограниченной способностью биосферы Земли поглощать промышленные и сельскохозяйственные загрязнения. Основной вывод авторов состоит в том, что если не принять срочных мер в масштабах всей планеты по кардинальному снижению экологической нагрузки и переходу к устойчивому развитию, то уже в обозримом будущем экономический рост сойдет на нет, что приведет к резкому снижению уровня жизни и безопасности людей на Земле.

Ситуация усугубляется тем, что кроме физических пределов роста, установленных Д. Медоузом и его соратниками, имеются также фундаментальные пределы роста, которым до сих пор не уделялось должного внимания. Напротив, большинство людей убеждено в том, что возможности экономического роста безграничны. Но это совсем не так.

В настоящей работе, пользуясь феноменологическими теориями демографического роста и технологического развития, мы подтверждаем существование также фундаментальных ограничений экономического роста, а следовательно, и потребления.

Без преувеличения можно утверждать, что в основе всех современных теорий и моделей экономического роста лежит неоклассическая модель роста, разработанная нобелевским лауреатом Робертом Солоу [2]:

$$Y(t) = A(t)K^{\alpha}(t)L^{1-\alpha}(t), \quad (1а)$$

$$\frac{dK}{dt} = I^K - \mu_K K = s_K Y - \mu_K K, \quad (1б)$$

где $Y(t)$ – объем выпуска национальной продукции (ВВП), $K(t)$ – текущий объем физического капитала, $L(t)$ – численность занятых в экономике (труд), α – постоянный параметр ($0 < \alpha < 1$), $A(t)$ – уровень развития инновационных технологий, μ_K – коэффициент выбытия капитала, s_K – норма накопления сбережений.

Анализируя модель роста (1), Р. Солоу показал, что в экономике существуют естественные тенденции, приводящие ее к долгосрочному устойчивому равновесию. Главный его вывод заключается в том, что независимо от уровня сбережений s в долгосрочном периоде экономика, поддерживаемая в устойчивом состоянии, определяется темпом роста населения q_L и темпом технологического прогресса q_A, т.е. $q_Y = (1-\alpha)^{-1}q_A + q_L$. Этот неожиданный вывод означает, что при отсутствии технологических изменений и инноваций наращивание капитала не вызывает прироста ВВП в силу убывающей отдачи капитала. Таким образом, единственный способ достичь более высокого уровня жизни – это постоянно стимулировать технологические изменения и инновации, т.е. повышать производительность труда.

Ниже мы покажем, что в XXI веке как темпы роста населения, так и темпы развития технологических инноваций будут постепенно, но неуклонно падать, вызывая соответствующее снижение темпов экономического роста.

Модель Солоу хорошо описывает экономический рост в развитых странах, для которых харак-

Институт математических исследований сложных систем Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

терна высокая капиталовооруженность $k = \frac{K}{L}$. Эта модель, как и все классические модели роста, основана на убывающей производительности факторов и постоянной отдаче от масштаба.

Для адекватного описания экономического роста в развивающихся странах более подходят модифицированные модели Солоу с включением человеческого капитала. Среди таких моделей наиболее широко используется модель Г. Мэнкью, Д. Ромера, Д. Уэйла с нейтральным по Харроду [3] техническим прогрессом,

$$Y(t) = K^{\alpha}(t)H^{\beta}(t)[A(t)L(t)]^{1-\alpha-\beta}, \tag{2}$$

где H – человеческий капитал, $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\alpha + \beta < 1$. В этой модели человеческий капитал выступает как производственный фактор и процесс его накопления принимается аналогичным для физического капитала. Авторы показали, что на тот момент для развитых стран $\alpha = 0.14$ и $\beta = 0.37$, а для развивающихся стран $\alpha = 0.29$ и $\beta = 0.3$, т.е. $\alpha \approx \beta = 0.3$. Для неоклассической модели Солоу (1) $\alpha = 0.37$ для развитых стран и $\alpha = 0.6$ для развивающихся стран. Они также показали, что для долговременного устойчивого роста инвестиции в человеческий капитал – здоровье, знания и повышение трудовых навыков – столь же важны, как и инвестиции в физический капитал, поскольку для практической реализации потенциала современных технологий требуются квалифицированные кадры.

Рассмотрим теперь основные факторы экономического роста: численность занятых в экономике и технический прогресс, обусловленный технологическими инновациями.

Наиболее фундаментальными работами в области теоретической демографии по праву считаются работы С.П. Капицы, который разработал весьма оригинальную феноменологическую теорию роста человечества [4] и показал, что демографическая динамика может быть представлена следующим уравнением с соответствующим аналитическим решением, описывающим рост численности населения Земли:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{C}{(T_1 - t)^2 + \tau^2}, \tag{3а}$$

$$N = K^2 \operatorname{arcctg}\left(\frac{T_1 - t}{\tau}\right), \tag{3б}$$

где N – текущая численность населения Земли, τ – параметр, характеризующий активный период жизни человека, T_1 – критический год для демографического перехода, C – константа, $K = \sqrt{\frac{C}{\tau}}$ – число Капицы.

Опираясь на данные мировой демографической статистики, С.П. Капица подсчитал численные значения постоянных:

$$C = 163 \cdot 10^9, \quad K = 60100,$$

$$\tau = 45 \text{ лет}, \quad T_1 = 1995 \text{ г.}$$

Далее нетрудно подсчитать, что при этих значениях параметров и констант $N_{\max} = \pi K^2 \simeq 11.36$ млрд. чел., что следует из формулы (3б). Такова по С.П. Капице верхняя оценка численности населения Земли в обозримом будущем [4]. График роста численности населения Земли, рассчитанной по формуле Капицы (3б), представлен на рис. 1, где также приводится фактическая (наблюдаемая) численность населения Земли. Важно отметить, что темпы роста численности населения Земли $\left(q_N = \frac{dN}{Ndt}\right)$ уже прошли через максимум и в дальнейшем они будут только падать, приближаясь к нулю. По мере того как скорость роста падает, значение численности населения Земли выходит на плато и стабилизируется. Следует также отметить, что такой сценарий роста реализуется только при устойчивом развитии человечества. Из рассмотрения рис. 1 видно, что формула Капицы (3б) прекрасно аппроксимирует демографическую динамику Мир-Системы особенно в период демографического перехода. Мы воспользуемся ею для прогноза динамики мировой демографии в XXI веке.

А.В. Коротаев, А.С. Малков и Д.А. Халтурина разработали математическую макромодель для описания демографического и экономического роста Мир-Системы [5]. Представляют интерес следующие результаты, полученные указанными авторами:

$$S = \gamma N, \quad Y = \gamma N^2, \tag{4}$$

где S – избыточный продукт, производимый на одного человека сверх прожиточного минимума m ($m \simeq 420$ в международных долларах 1990 г.), необходимого для простого воспроизводства населения; γ – константа, $\gamma = 1.04 \cdot 10^{-6}$.

Выражения (4) можно рассматривать как эмпирические соотношения. Они показывают, что мировое производство избыточного продукта (ВВП) на душу населения пропорционально численности населения Мир-Системы, а мировое ВВП – квадрату численности населения. Эти соотношения справедливы для классической модели экономического роста с убывающей производительностью факторов. Поскольку в двадцатом столетии на базе экономики, основанной на знаниях и наукоемких технологиях, появились новые отрасли с возрастающей производительностью факторов, то (4) следует скорректировать следующим образом:

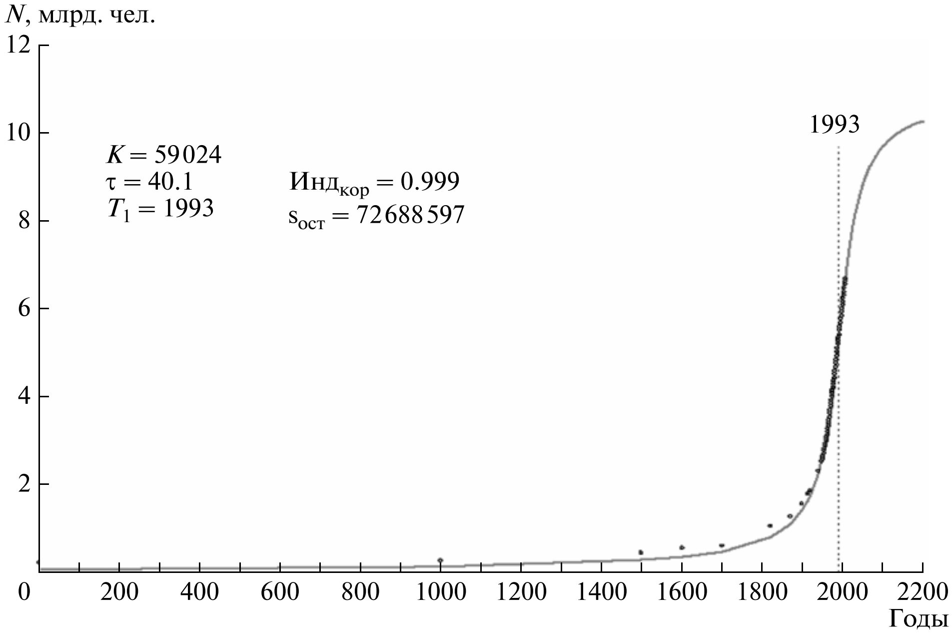

Рис. 1. Модель Капицы для численности населения Земли по формуле (3б). $K = 59024$, $\tau = 40.1$, $T_1 = 1993$, $\text{Инд}_{\text{кор}} = 0.999$, $\sigma_{\text{ост}} = 72\,688\,597$.

$$S = \gamma N^{1+\delta}, \quad Y = \gamma N^{2+\delta}, \tag{5}$$

где δ – параметр, учитывающий вклад отраслей с возрастающей отдачей. Эмпирическое исследование соотношения (5) на основе последних статистических данных по динамике мировой экономики показывает, что действительно имеет место тенденция увеличения вклада отраслей с возрастающей отдачей, но она незначительна в масштабах всей мировой экономики (см. рис. 2), хотя весьма существенна для авангардных стран. Например, для экономики США $\delta = 0.79$, $\gamma = 4.7 \cdot 10^{-9}$, тогда как для мировой экономики в целом $\delta = 0.11$, $\gamma = 1.78 \cdot 10^{-7}$. В дальнейшем мы воспользуемся формулами (5) для расчета прогнозных значений S и Y.

Нам также понадобится эмпирический (стилизованный) факт Н. Калдора [6], который состоит в том, что “отношение физического капитала к выпуску в долгосрочном периоде почти константа”, т.е.

$$K = c_K Y, \tag{6}$$

где c_K – постоянный коэффициент. Рассчитав корреляционную связь между физическим капиталом и ВВП для США и ряда других стран в период 1950–2003 гг., мы убедились, что эмпирическое соотношение (6) по-прежнему справедливо.

Итак, для долгосрочного качественно-количественного анализа и прогнозирования экономического роста и потребления, мы предлагаем следующую компактную математическую модель, состоящую из формул (1а), (2), (3б), (5) и (6) и дифференциальных уравнений накопления физического (1б) и, аналогичным образом, человеческого капитала:

$$Y = AK^{\alpha}L^{1-\alpha}, \tag{7а}$$

$$Y = K^{\alpha}H^{\beta}[AL]^{1-\alpha-\beta}, \tag{7б}$$

$$N = K^2 \operatorname{arcctg}\left(\frac{T_1 - t}{\tau}\right), \tag{7в}$$

$$L = c_L N, \tag{7г}$$

$$S = \gamma N^{1+\delta}, \tag{7д}$$

$$Y = \gamma N^{2+\delta}, \tag{7е}$$

$$\frac{dK}{dt} = I^K - \mu_K K, \tag{7ж}$$

$$\frac{dH}{dt} = I^H - \mu_H H, \tag{7з}$$

$$K = c_K Y. \tag{7и}$$

Все формулы, представленные в данной модели, носят приближенный характер. Вместе с тем они достаточно точно описывают долговременные тенденции развития мировой динамики между соответствующими основными переменными и широко используются в прогнозных расчетах. Мы не ставим задачу расчета траектории экономического роста с высокой точностью. Нас больше интересуют вопросы качественного поведения роста, а самое главное, каковы пределы экономического роста, обусловленные основными факторами: демографической динамикой и тех-

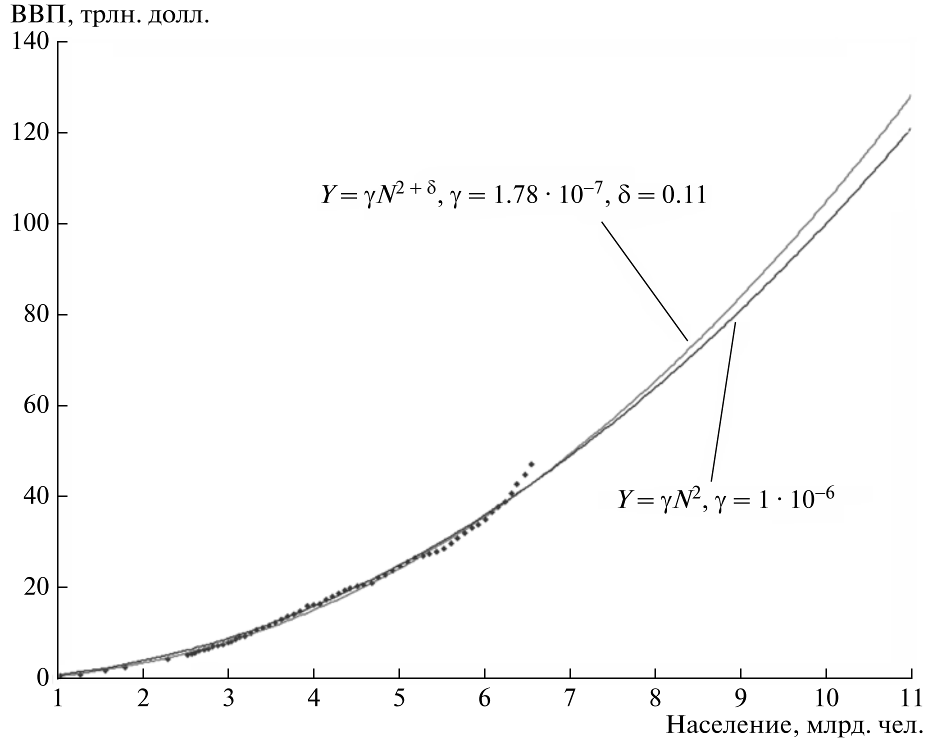

Рис. 2. Вклад в мировой ВВП отраслей экономики с возрастающей отдачей.

нологическим прогрессом. Наконец, как оптимально распределить ограниченный избыточный ВВП исходя из целей максимизации полезности потребления, определяемой желательной степенью экологической безопасности. Модель (7) вполне отвечает этим целям.

Рассмотрим сначала экономический рост в рамках модели Солоу (7а). Подставляя (7в) в (7е), получаем формулу для приближенного расчета – прогнозирования мирового ВВП и темпов его роста:

$$Y = \gamma K^{(4+2\delta)} \operatorname{arcctg}^{(2+\delta)}\left(\frac{T_1 - t}{\tau}\right),$$
$$q_Y = \frac{dY}{Ydt} = (2+\delta)\frac{dN}{Ndt} = (2+\delta)q_N. \tag{8}$$

Отсюда непосредственно следует (при $\delta = 0.11$ и $\gamma = 1.78 \cdot 10^{-7}$), что

$$Y_{\max} = Y(t)|_{t\to\infty} = \gamma\pi^{2+\delta}K^{4+2\delta} \simeq 137 \text{ трлн. долл.} \tag{9}$$

Это асимптотический верхний предел роста мирового ВВП. Как видим, он составляет два нынешних размера мирового ВВП или всего в десять раз превышает нынешний объем ВВП США. Соотношение $K = c_K Y$ (7и) описывает динамику физического капитала, обеспечивающего потенциальный экономический рост (8).

Пользуясь уравнением накопления капитала (7ж) и соотношениями (7и), (7е), получаем формулу для расчета требуемой динамики инвестиций на душу населения, а также нормы сбережений:

$$\frac{I^K}{N} = c_K\gamma[\mu_K + (2+\delta)q_N]N^{1+\delta}, \tag{10}$$

$$s_K = \frac{I^K}{Y} = c_K[\mu_K + (2+\delta)q_N]. \tag{11}$$

Важно отметить, что выбор текущей нормы сбережения s_K в соответствии с выражением (11) является условием устойчивого развития мировой экономики в долгосрочном периоде.

Теперь рассмотрим экономический рост по более гибкой модели Мэнкью–Ромера–Уэйла (7б), учитывающей вклад человеческого капитала. Запишем соответствующую производственную функцию (7б) в интенсивной форме:

$$y = k^\alpha h^\beta, \quad y = \frac{Y}{AL}, \quad k = \frac{K}{AL}, \quad h = \frac{H}{AL}. \tag{12}$$

Представив далее уравнения накопления капитала (7ж) и (7з) также в интенсивной форме и учитывая, что в устойчивом состоянии $\frac{dk}{dt} = 0$, $\frac{dh}{dt} = 0$, из полученных уравнений находим

$$k = \left(\frac{s_K}{\mu_K + q_N + q_A}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} h^{\frac{\beta}{1-\alpha}}, \tag{13}$$

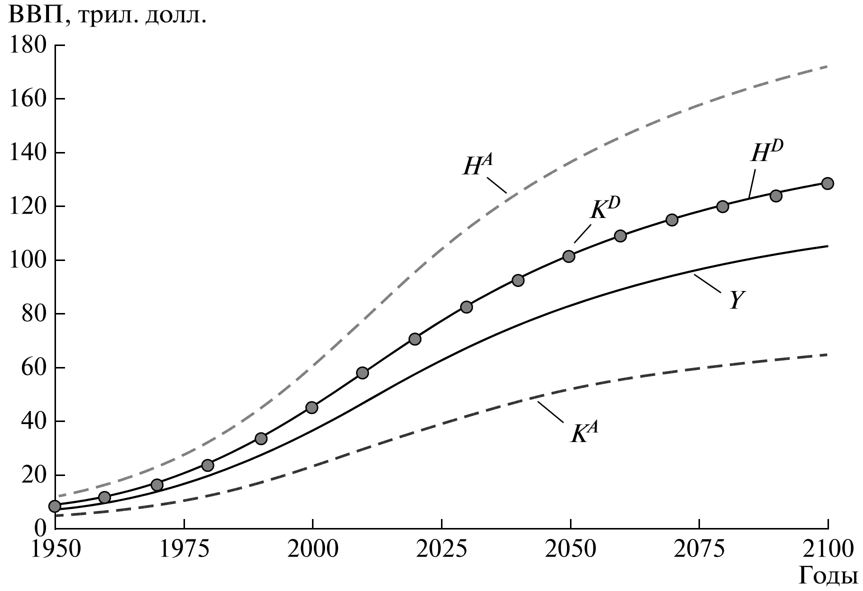

Рис. 3. Динамика мирового ВВП и обеспечивающие ее физический и человеческий капитал.

$$h = \left(\frac{s_H}{\mu_H + q_N + q_A}\right)^{\frac{1}{1-\beta}} h^{\frac{\alpha}{1-\beta}}. \qquad (14)$$

Из уравнения для устойчивого состояния y (12) находим выражение для определения динамики технологического прогресса A:

$$A = c_L^{-1} c_K^{-\frac{\alpha}{1-\alpha-\beta}} c_H^{-\frac{\beta}{1-\alpha-\beta}} \left(\frac{Y}{N}\right),$$

$$q_A = \frac{dA}{Adt} = (1+\delta)q_N. \qquad (15)$$

Возвращаясь снова к абсолютным величинам основных переменных, соответственно получаем:

$$K = \frac{s_K \gamma N^{2+\delta}}{\mu_K + (1+\delta)q_N}, \quad H = \frac{s_H \gamma N^{2+\delta}}{\mu_H + (1+\delta)q_N}, \qquad (16)$$

$$Y = \gamma N^{2+\delta}.$$

Пользуясь данными формулами и уравнениями накопления капитала (7ж) и (7з), получаем следующие выражения для определения динамики требуемых инвестиций:

$$\frac{I^K}{N} = s_K \gamma N^{1+\delta} = s_K S, \quad \frac{I^H}{N} = s_H \gamma N^{1+\delta} = s_H S, \qquad (17)$$

причем

$$s_K = c_K[\mu_K + (1+\delta)q_N], \quad s_H = c_H[\mu_H + (1+\delta)q_N],$$

поскольку $K = c_K \gamma N^{2+\delta}$ и $H = c_H \gamma N^{2+\delta}$. Здесь нормы накопления s_K и s_H выступают в качестве управляющих параметров. Поддержание этих параметров на уровне, определяемом соотношениями (17), обеспечивает долгосрочное равновесие в мировой экономике.

Для определения коэффициентов c_K, c_H и норм накопления s_K и s_H можно воспользоваться соотношениями

$$c_K = c_L \frac{\tilde{k}}{\tilde{y}}, \quad c_H = c_K, \quad s_K = s_H = c_K[\mu + (1+\delta)q_N] \qquad (18)$$

$$\left(\bar{y} = \frac{Y}{N}, \quad \bar{k} = \frac{K}{L}\right),$$

которые справедливы при $\alpha = \beta$ и $\mu = \mu_H = \mu_K$, характерных для мировой экономики в целом. Нетрудно также показать, что в общем случае, когда $\alpha \neq \beta$, имеем

$$c'_K = \frac{c_K}{1+\beta/\alpha}, \quad c'_H = \frac{c_K}{1+\alpha/\beta}. \qquad (19)$$

Рост мирового ВВП в XXI веке наряду с графиками движения требуемых физического и человеческого капитала представлен на рис. 3, из которого следует, что мировая экономика в целом для обеспечения потенциального роста мирового ВВП затрачивает больший по объему физический капитал ($K^D = H^D$), нежели сам ВВП, тогда как развитые страны обходятся гораздо меньшим объемом капитала K^A, вкладывая больше инвестиций в человеческий капитал H^A. Это объясняется тем, что в развитых странах благодаря высоким технологиям капитал используется более эффективно, чем в развивающихся странах.

Рассмотрим теперь инвестиции в природоохранные меры для достижения и поддержания устойчивого экологического баланса. Совокупные затраты на охрану окружающей среды во всех странах мира в 2000 г. оценивались в 250 млрд. долларов [7, с. 172], что соответствовало 0.8% ми-

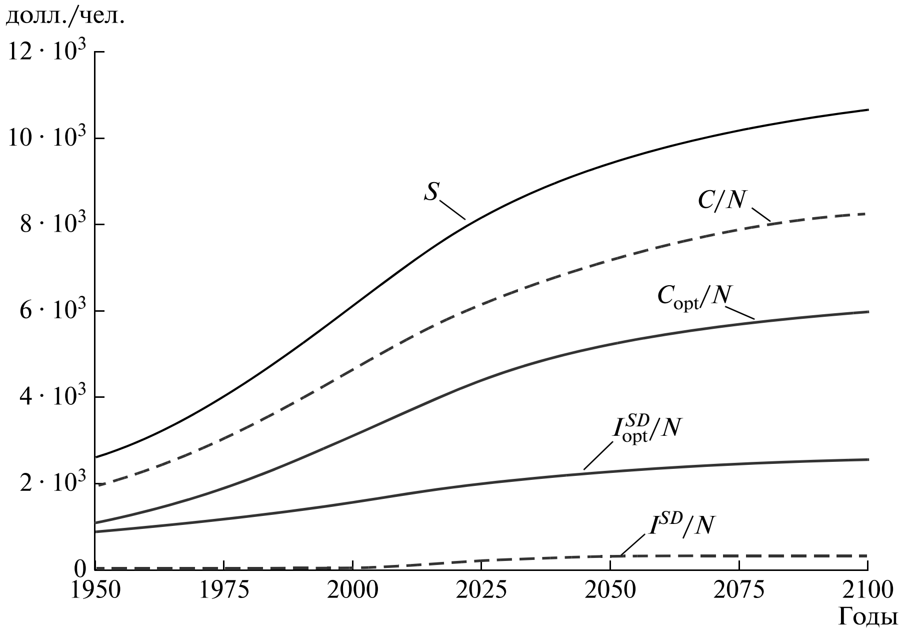

Рис. 4. Оптимальное распределение подушевого избыточного продукта.

рового ВВП, причем эти затраты в существующей стратегии обеспечения экологической безопасности привязаны к максимальным расходам на цели экономического развития. Наиболее вероятной траекторией выхода природоохранных инвестиций на требуемый уровень является логистическая функция, которую можно записать в виде

$$\frac{I^{SD}}{N} = \frac{I_M^{SD}}{N} \cdot \frac{I_0^{SD}}{I_0^{SD} + (\rho I_M^K - I_0^{SD})\exp[-z(t-T_0)]}, \quad (20)$$

где I_0^{SD} – суммарные затраты на охрану окружающей среды в 2000 г., $z = 0.1$, $I_M^{SD} = \rho I_M^K$, I_M^K – максимальный объем инвестиций на цели экономического развития в целевом году.

Таким образом, для расчета душевого потребления с учетом реализации природоохранных мероприятий получаем следующее выражение:

$$c = \frac{C}{N} = \gamma N^{1+\delta} - \frac{I^K}{N} - \frac{I^H}{N} - \frac{I^{SD}}{N}. \quad (21)$$

Как показано на рис. 4, при таком сценарии развития мировой экономики львиная доля избыточного мирового ВВП ($S = \gamma N^{1+\delta}$) расходуется на общее потребление, включая частное и государственное. Учитывая, что в XXI веке доля физического капитала непрерывно уменьшается, очевидно, что инвестиции, выделяемые на природоохранные мероприятия по традиционной стратегии (20), не решат главной проблемы – достижения устойчивого экологического баланса, не допускающего выход за пределы самоподдержания биосферы Земли. Поэтому требуется оптимальное распределение избыточного мирового ВВП.

Рассмотрим задачу оптимального выбора душевого потребления с учетом необходимости выделения достаточных объемов экологического инвестирования, требуемых для поддержания устойчивости биосферы Земли. Обозначим природоохранные инвестиции в расчете на душу населения Земли через $g(t)$,

$$g(t) = \frac{I^{SD}}{N}. \quad (22)$$

Будем предполагать, что это неубывающая функция ($g' \geq 0$) и что со временем она стремится к уровню насыщения, равному g_M. Тогда целесообразно использовать убывающую функцию $(g_M - g)^p$ в качестве дисконтирующей функции в задаче оптимизации распределения доходов [9]. Тем самым мы добиваемся, чтобы полезность потребления росла с ростом инвестиций на природоохранные мероприятия. Здесь показатель степени p играет роль показателя дисконтирования, отражающего межвременные предпочтения. При $p = 0$ предпочтение полностью отдается настоящему времени. Чем больше p, тем больше предпочтения отдается будущему.

Таким образом, показатель полезности потребления можно записать в виде функционала

$$J = \int_0^\infty \left(\gamma N^{1+\delta} - \frac{I^K}{N} - \frac{I^H}{N} - g\right) \cdot (g_M - g)^p dt. \quad (23)$$

Функционал (23) можно записать также в виде

$$J = \int_0^\infty f(t, g, c)dt,$$

где $c = \gamma N^{1+\delta} - \frac{I^K}{N} - \frac{I^H}{N} - g$ – потребление на душу населения Земли. Можно, конечно, рассматривать данный функционал с конечным горизонтом ($T_0 \le t \le T$). В любом варианте задача сводится к определению функции $g(t)$, которая максимизирует функционал (23). Условие оптимальности (уравнение Эйлера–Лагранжа) в этом случае принимает весьма простой вид: $\frac{df}{dg} = 0$. Дифференцируя интегрант $f(t, g, c)$ функционала J (23) по g, получаем уравнение

$$p\left(\gamma N^{1+\delta} - \frac{I^K}{N} - \frac{I^H}{N}\right) + g_M - (p+1)g = 0. \quad (24)$$

Отсюда непосредственно следует

$$g = \frac{p}{p+1}\left(\gamma N^{1+\delta} - \frac{I^K}{N} - \frac{I^H}{N}\right) + \frac{g_M}{p+1}, \quad (25а)$$

$$c = \frac{1}{p+1}\left(\gamma N^{1+\delta} - \frac{I^K}{N} - \frac{I^H}{N}\right) - \frac{g_M}{p+1}. \quad (25б)$$

Выбор конкретного значения показателя дисконтирования p требует тщательного подхода. Для того чтобы найти оптимальное значение p, необходимо прежде всего определить желательную программу расширения природоохранных мероприятий, а затем аппроксимировать ее функцией $(g_M - g)^p$, что нетрудно сделать, уже зная вид самой функции $g(t)$ (25). Мы в расчетах приняли $p = \frac{1}{3}$. Оптимальные траектории потребления и экологического инвестирования представлены на рис. 4 наряду с траекториями, полученными по традиционной схеме распределения (20), (21). Из рис. 4 видно, что на экологические инвестиции уже расходуется почти четверть избыточного мирового ВВП. Половины избыточного ВВП более чем достаточно для удовлетворения потребностей частного и государственного секторов, если существенно снизить расходы на военные цели.

Таким образом, мировое сообщество должно изменить курс экономического развития в пользу модели устойчивого развития [1]. На смену озабоченности ростом производства и потребления должны прийти принципы умеренности и самоограничения в потреблении. В XXI веке экономический рост, основанный только на сбалансированном накоплении, будет более стабильным и долговечным. Это означает, что инвестиции во все виды ресурсов (человеческий, природный и физический) для повышения роста и благосостояния должны быть равномерными и определяться путем оптимизации полезности потребления исходя из необходимости сохранения устойчивости и самоподдержания биосферы Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медоуз Д., Рандерс И.* Пределы роста. 30 лет спустя. М.: Академкнига, 2008. 342 с.
2. *Solow R.* // Quart. J. Economics. 1956. V. 70. P. 65–94.
3. *Mankiw G., Romer D., Weil D.* // Quart. J. Economics. 1992. V. 107. № 2. P. 407–437.
4. *Капица С.П.* Очерк теории роста человечества. Демографическая революция и информационное общество. М.: Никитский клуб, 2008. 64 с.
5. *Коротаев А.В., Малков А.С., Халтурина Д.А.* Законы истории. Математическое моделирование развития Мир-Системы. М.: Ком-Книга, 2007. 224 с.
6. *Kaldor N.* The Theory of Economic Growth. N. Y.: St. Martin's Press, 1961. P. 177–222.
7. *Ильин И.В., Иванов А.В.* Введение в глобальную экологию. М.: Изд-во МГУ, 2009. 386 с.
8. *Ищенко Е.Г.* Энергоэкологическое будущее цивилизации. М.: МИСК, 2008. С. 401–419.
9. *Столерю Л.* Равновесие и экономический рост. М.: Статистика, 1974. 471 с.