

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

том 10 номер 8 год 1998

## ХИК МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

ДК 519.86

### РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА

© Н.Н. Олениев, А.А. Петров, И.Г. Постепов

Вычислительный Центр РАН, Москва

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований  
(коды проектов 96-15-96207 и 98-01-00777)

Предложенная модель взаимодействия рыночной экономики и природной среды. Для описания процессов в природной среде использована упрощенная модель экосистемы, подверженной внешним воздействиям. В основе описания процессов в экономике лежит модель цикла основных фондов с учетом резервных мощностей. Предполагалось, что государство формирует экологический налог, взимаемый с выброса вредных отходов и получая плату за используемый в производстве природный ресурс. Предпринята попытка описание возможных механизмов общественного воздействия на экономический рост, который обеспечивал бы благоприятную эволюцию экосистемы.

#### ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF ECONOMIC GROWTH

N.N.Olenov, A.A.Petrov, I.G.Postepov

Computing Center of Russian Academy of Sciences, Moscow

An eco-economy model with market mechanisms of production regulation, exchange and distribution is offered. For the description of the environmental processes a simplified model of ecosystem under external influences is used. The base of the description of the economic processes is a life-cycle model of capital with reserve capacities. It was supposed, that the state forms ecological funds by raising the emission fees from harmful waste and by payment for a natural resource used in production. An attempt to construct the description of mechanisms of public influence on economic growth is undertaken which would provide favorable evolution of the ecosystem.

#### 1. Устойчивое развитие и окружающая среда

Экономическая деятельность людей воздействует на состояние природных систем — увеличивается загрязнение окружающей среды, истощаются запасы традиционных сырьевых ресурсов. Истощение и изменение производственных качеств природных ресурсов отражаются на изменении показателей экономических механизмов регулирования — цены, ренты и т.п. Все взаимосвязано; экономика — часть биосферы, а освоенная человеком биосфера — составная часть экономики. Поэтому не случайно была выдвинута идея устойчивого развития экономики, согласованного с ресурсами биосферы (sustainable development). Подобную идею о существу-

#### экологических последствий экономического роста

19

3. Взаимодействие экономики и природной среды исследуется как определенный механизм обратной связи, описывающий экономические решения, которые принимает общество в ответ на ухудшение экологии.

#### 2. Воздействие загрязнений на экосистему

Для исследования качественных особенностей эволюции экосистемы используется простую модификацию динамического варианта модели лесной экосистемы [17, 15], которая позволяет дать четкую физическую интерпретацию каждому параметру.

Блок "Экосистема" модели описывает оборот углерода между следующими компонентами лесной экосистемы: зеленая фитомасса деревьев, древесина и корни деревьев, подстилка, гумус, растительность травяно-кустарникового яруса. Внешние воздействия задаются тремя показателями: объединяющий все промышленные загрязнения комплексный показатель, измеряемый в баллах; скорости выбросов и посадки деревьев, от которых зависят потребление и восстановление природного ресурса.

Углерод воздуха фиксируется зеленой фитомассой деревьев со скоростью  $Q^Z$  и оттуда в процессе роста деревьев со скоростью  $Q^W$  переходит в biomassу древесины и корней, а в результате опадания листьев — в подстилку со скоростью  $Q^P$ . Поскольку нас интересуют процессы с характерными временами порядка 10 лет, изменение зеленой biomassы можно считать быстрым процессом и положить [17]

$$Q^Z = Q^W + Q^P. \quad (2.1)$$

Запас углерода в biomassе древесины и корней  $W$  уменьшается за счет разложения biomassы со скоростью  $Q^K$ , а также изменяется за счет потоков потребления ресурса биосферой  $F$  и восстановления этого ресурса  $S$ :

$$dW/dt = Q^W - Q^K + S - F. \quad (2.2)$$

Углерод в подстилке  $V$  образуется за счет опадания и фиксации углерода травянистой растительностью  $Q^T$  и уходит из подстилки вследствие разложения  $Q^R$  и смысла  $R^V$ :

$$dV/dt = Q^T + Q^K + Q^Y - Q^R - R^V. \quad (2.3)$$

В результате разложения подстилки пополняется запас углерода в гумусе  $U$  со скоростью  $Q^G$ . Этот запас уменьшается в результате смысла  $R^U$  и разложения (выделения в атмосферу)  $Q^A$ :

$$dU/dt = Q^G - Q^K - R^U. \quad (2.4)$$

Предполагается, что отсутствие загрязнений и хозяйственной деятельности человека экосистема пребывает в некотором стационарном состоянии. Потоки и запасы углерода, соответствующие этому стационарному состоянию будем помечать наклонным индексом "0", а фактические потоки определять по отношению к этому стационарному состоянию.

Скорости фиксации углерода зеленой фитомассой  $Q^Z$  и  $Q^W$  определяются запасом питательных веществ в почве, пропорциональным  $U$ . У деревьев она зависит от их размера, пропорциональным  $W$ , и от количества biomassы подстилки  $V$ . Если biomassы подстилки меньше критической величины  $V_c$ , рост деревьев вообще прекращается. Линейная соответствующая зависимости для трав и деревьев

18

Н.Н. Олениев, А.А. Петров, И.Г. Постепов

зыкал в свое учении о ноосфере, ставя вопрос "о пестротеке биосферы в интересах свободы мыслящего человека, как единого целого" [1]. В наши дни учение В.И. Вернадского о ноосфере развил Н.Н. Монсеев, разработав принцип козволовии природы и общества [2].

Оценки альтернативных стратегий экономического роста по отношению к устойчивому развитию сильно зависят от предположений о будущих технологических параметрах и будущих структурных изменениях. Например, в широко известных работах Форрестер и его ученики [3, 4] исходили из отсутствия каких-либо структурных изменений в будущем. Естественно, что они пришли к концепции "нулевого роста", которая получила широкий общественный резонанс и иннициатива движения "зеленых" за запрещение производства, затягивающих окружающую среду, движение за ограничение роста экономики. В противоположность этому в [5] при обсуждении перехода экономики России к устойчивому развитию показана важность учета перестройки экономических отношений. В [6] изучается оптимальная экономическая политика в ответ на изменения климатических условий; при этом обнаружено, что темп устойчивого вынужденного роста продукции и темп снижения выбросов углекислого газа более чувствительны к технологическим параметрам, чем к параметрам изменения климата или параметрам, описывающим ущерб. Тем не менее, в большинстве работ, оценивающих влияние экономических стратегий на качество окружающей среды, параметры, описывающие технологические изменения, считаются экогенными [7].

В небольшой части западной литературы по взаимодействию экономического роста и окружающей среды, где экономический рост определяется эндогенно (например, в [8, 9]), для описания экономических процессов используется "новая теория роста" [10–13]. В [14] предполагается, что оценка экологических последствий экономических решений может быть сделана на основе моделей, в совокупности описывающей сложную систему экономических и экологических процессов.

Настоящая работа продолжает исследование, начатые в [15], развивая, конкретизируя положения "Концепции математического обеспечения новых информационных технологий оценки экологических последствий экономических решений" [14]. Целью работы было исследовать влияние качественных особенностей отдаленных последствий экономических решений на состояние природной среды. Предполагается, что производство сопровождается выбросом вредных отходов, причем каждая технология характеризуется своей нормой выброса загрязнения на единицу выпуска продукта. Кроме того предполагается, что реусы биосфера используются в производстве. Производство и потребление продукта регулируются рыночными механизмами, на которые накладываются общественные воздействия в виде налогов, штрафов, общественного потребления. Эти воздействия формируются в результате компромисса различных социальных групп. Описание информированности основных социальных групп о состоянии природной среды составляет особую модель экологического мониторинга. От существующей литературы по экономическому росту и проблемам окружающей среды настоящая работа отличается теми аспектами.

1. Для описания производства используется усовершенствованная модель жизненного цикла фирмы [16]. Это макромодель, выведенная из микроанализа и специально приспособленная для моделирования технологических изменений.

2. Для описания окружающей среды использована не абстрактная модель некоторого качества окружающей среды, как, например, в [8, 9] в дальнейшем других работ по эколого-экономической проблематике, а конкретная, хорошо верифицированная модель лесной экосистемы из [17]. Для качественных выводов характер исполнения конкретной модели позволяет коррект-

подстилки больше критической величины  $V_-$ , и предполагаем, что процесс фиксации углерода воздуха частично угнетается загрязнением, получаем

$$Q^G/Q_0^G = 1 + a^G(U/U_0 - 1) - \beta^G PQ^G/Q_0^G, \quad (2.5)$$

$$Q^Z/Q_0^Z = 1 + a^Z(U/U_0 - 1) + b^Z(W/W_0 - 1) - \beta^Z PQ^Z/Q_0^Z \text{ при } V > V_-, \quad (2.6)$$

и

$$Q^Z = 0 \text{ при } V \leq V_-.$$

Следовательно,

$$Q^Z/Q_0^Z = [1 + a^Z(U/U_0 - 1) + b^Z(W/W_0 - 1) - \beta^Z PQ^Z/Q_0^Z] \theta(V - V_-). \quad (2.7)$$

Здесь  $P$  — комплексный показатель загрязнения,  $a^G, \beta^G, a^Z, b^Z, \beta^Z$  — постоянные,  $\theta(x) = 1$  при  $x > 0$ ,  $\theta(x) = 0$  при  $x \leq 0$  — функция Хевисайда.

Поток углерода из зеленой фитомассы деревьев в древесину и корни  $Q^W$  считаем заданный долей потока  $Q^Z$  (учтывается также утнетение процесса ростом загрязнения), а поток углерода в подстилки и гумус  $Q^H$  — фиксированной долей  $Q^H$ :

$$Q^W = (Q_0^W/Q_0^Z) Q^Z - \beta^W PQ^W = \alpha^W Q^Z / (1 + \beta^W P), \quad \alpha^W = (Q_0^W/Q_0^Z), \quad (2.7)$$

$$Q^H = \alpha^Y Q^H, \quad \alpha^Y = (Q_0^H/Q_0^Z). \quad (2.8)$$

Здесь  $\beta^W$  — постоянная.

Скорость разложения древесины, подстилки и гумуса считаются пропорциональными соответствующим запасам с учетом того, что два последних процесса могут угнетаться загрязнением:

$$Q^K = (Q_0^K/W_0) W, \quad (2.9)$$

$$Q^H = (Q_0^H/V_0) V - \beta^V PQ^H = k^V V / (1 + \beta^V P), \quad k^V = (Q_0^H/V_0), \quad (2.10)$$

$$Q^A = (Q_0^A/U_0) U - \beta^U PQ^A = k^U U / (1 + \beta^U P), \quad k^U = (Q_0^A/U_0). \quad (2.11)$$

Здесь  $\beta^V, \beta^U$  — постоянные.

Интегральными суммами подстилки и гумуса также считаются пропорциональными соответствующим запасам

$$R^V = k^V J(W)V, \quad R^H = k^U J(W)U, \quad (2.12)$$

где множитель  $J(W)$  описывает воздействие биомассы лесной растительности, блокирующее разрушение почвы:

$$J(W) = J_1 + (J_2 - J_1)(1 - W/W_1)\theta(W_1 - W). \quad (2.13)$$

Здесь  $J_1, J_2, W_1$  — постоянные:  $J_1 < J_2, W_1 < W_0$ . Постоянные  $k^V$  и  $k^U$  легко находятся из условия стационарности экосистемы при отсутствии внешних воздействий (см. (2.3),(2.4)).

Функция  $B(t, \tau)$  показывает, какому количеству продукта эквивалентна единица демонтированной мощности. Она убывает с возрастом фирм  $t - \tau$ , а  $B(t, \tau) = b(\tau)$ , где  $b(\tau) = b(\nu, c, a(\tau))$ .

Как и в [16], предполагаем, что увеличение загрузки мощности  $\zeta$  влечет увеличение ставки заработной платы занятых по сравнению с базовой величиной  $s$  в  $K(\zeta)$  раз, где  $K(\zeta)$  — монотонно возрастающая, выпуклая функция. Если текущая загрузка мощности будет  $\zeta$ , выпуск продукции фирмой составит  $g(t, \tau) = m(t, \tau)$  и приносит фирме прибыль  $z^L(t, \tau) = [\zeta(p(t)(1 - N(t)c(\tau)) - g(t)a(\tau))] - K(\zeta)s(t)\lambda(t, \tau)m(t, \tau)$ , где  $N(t)$  — ставка налога на загрязнение. Поскольку в реальном мире издержки возрастают, фирме, как правило, невыгодно полностью ставить  $\zeta$  на полную загрузку мощности.

Петрудно показать, что оптимальная загрузка составляет величину  $\zeta(p(t, \tau))$ , где

$$\rho(t, \tau) = (p(t)(1 - N(t)c(\tau)) - g(t)a(\tau)) / (s(t)\lambda(t, \tau)), \quad (3.1)$$

$\zeta(\cdot)$  — функция, обратная к производной функции  $K(\cdot)$ :  $\zeta(1) = 0, \zeta'(\rho) > 0$  при  $\rho > 1$ . В численных экспериментах считалось, что  $\zeta(\rho) = 1 - \exp(-\alpha_1(\rho - 1))$  (см. [16]). При этом можно рассчитать выпуск фирмой  $m(t, \tau)c(p(t, \tau))$ , число занятых на  $t$  и ее прибыль  $z^L(t, \tau)$  (см. [16]).

Если пренебречь ликвидными активами фирмы, ее текущий финансовый баланс примет вид

$$z^L(t, \tau) + z^U(t, \tau) - h(t, \tau) - d(t, \tau) = 0. \quad (3.2)$$

Здесь  $d(t, \tau)$  — чистая прибыль фирмы, поступающая в доход ее собственников  $h(t, \tau)$  — обслуживание долгов. Как и в [16] считаем, что собственники передают все свои доходы в форме банковских депозитов  $q(t, \tau)$ :

$$d(t, \tau)/dt = r_2(t)q(t, \tau) + d(t, \tau), \quad q(t, \tau) = 0, \quad (3.3)$$

где  $r_2(t)$  — процент по депозитам. Если фирму считать обществом с ограниченной ответственностью, то надо полагать, что  $d(t, \tau) \geq 0, h(t, \tau) \leq z^L(t, \tau) + z^U(t, \tau)$ . В момент создания  $\tau$  фирма имеет балансовую стоимость  $k(t, \tau) = \Phi^I(\tau)$  и равную ей задолженность банку  $l(t, \tau)$ . В дальнейшем при  $t > \tau$  балансовая стоимость  $k(t, \tau)$  (финансовая) уменьшается вследствие демонтажа и амортизации с темпом  $\rho$ :

$$9k(t, \tau)/dt = -\rho k(t, \tau) - u(t, \tau)k(t, \tau). \quad (3.4)$$

Задолженность же растет за счет начисления процента  $r_1(t)$  и убывает из-за погашения долга  $h(t, \tau)$

$$9h(t, \tau)/dt = r_1(t)l(t, \tau) - h(t, \tau) \quad (3.5)$$

Считается, что кредиты обеспечиваются балансовой стоимостью фирмы, а  $r_1(t)$  не используется для накопления сбережений:

$$0 \leq l(t, \tau) \leq k(t, \tau). \quad (3.6)$$

Ограничительность площадей, занятых лесом, выражается условием

$$0 \leq W \leq \bar{W}. \quad (2.14)$$

где неравенство  $\bar{W} \geq W_0$  задает предельную величину биомассы лесов.

Прежде чем использовать блок "Экосистема" в модели с ним в автономном режиме были проведены численные эксперименты, которые показали достаточную обоснованность примененного упрощения и позволили из результатов натурных измерений [17] получить разумные численные значения параметров блока. Методика и результаты этих исследований будут приведены в отдельной публикации.

### 3. Модель жизненного цикла производственной фирмы и промышленные загрязнения

Мы можем привести здесь детальное описание довольно сложной модели производства. Поэтому сосредоточим лишь на новых моментах, а за обсуждением базовых понятий описания отсылаем к [16].

Рассмотрим хозяйство, в котором производится единственным однородным продуктом, а в производстве затрачиваются однородная рабочая сила и единственный природный ресурс, поступающий из biosfера. Производством управляют мелкие фирмы, которые продают продукт по единой цене  $p(t)$ , нанимают рабочую силу по единой ставке заработной платы  $s(t)$ , покупают природный ресурс по единой цене  $q(t)$ . За выбросы вредных отходов фирмы выплачивают налог-штраф, поступающий государству. Природный ресурс считается собственностью государства, которое получает доход от продажи его производителю.

Фирмы могут образовываться и ликвидироваться. Образующаяся в момент времени  $t$  фирма берет в банк кредит  $\Phi^I(\tau)$  для покупки фондообразующего продукта  $X^I(t) = \Phi^I(\tau)/p(t)$  и создает производственную мощность

$$m(\tau, \tau) = I(\tau) = \Phi^I(\tau)/(p(\tau)b(\nu, c, a)),$$

$$b(\nu, c, a) = b_1/((\nu + b_2)(c + b_3)(a + b_4)), \quad (3.1)$$

где  $b_1, b_2, b_3, b_4$  — постоянные, а  $b(\nu, c, a)$  — коэффициент пристойной фондоемкости, который зависит от технологий, используемых созданной мощностью. Технология характеризуется нормами затрат труда  $\nu$ , выброса загрязнений  $c$  и затрат природного ресурса  $a$  на единицу заработной платы продукции. Функцию  $b(\nu, c, a)$  мы считаем убывающей по переменным  $\nu, c$  и  $a$ , что соответствует увеличению капитальных затрат при использовании улучшенной технологии.

Пусть  $m(t, \tau)$  — мощность фирмы в момент  $t > \tau$ , а  $\lambda(t, \tau)$  — норма затрат труда. Если мощность уменьшается вследствие физического износа с постоянным темпом  $\mu$ , а число рабочих мест на  $t$  при этом мы считаем неизменным, то норма затрат труда с возрастом фирмы увеличивается (см. [16]), так же на фирме возраст  $t - \tau$  она равна  $\lambda(t, \tau) = v(\tau) \exp(\mu(t - \tau))$ . Остальные характеристики технологии с  $\nu$  и  $a$  считаем не изменяющимися с возрастом производственной мощности.

По решению фирмы мощность может демонтироваться. Темп демонтажа вообще говоря, переменный) обозначим через  $u(t, \tau) > 0$ . Тогда  $\partial m(t, \tau)/\partial t = -\mu m(t, \tau) - u(t, \tau)m(t, \tau)$ ,  $m(t, \tau) \geq 0$ . Демонтированная мощность продается на рынке наравне с остальным продуктом и приносит фирме доход

$\nu, s, \tau_1, \tau_2$ . Будем считать, что фирма в первую очередь погашает задолженность, а потом уже накапливает прибыль:

$$h(t, \tau) = z^L(t, \tau) + z^U(t, \tau), \quad d(t, \tau) = 0, \text{ если } l(t, \tau) > 0,$$

$$h(t, \tau) = 0, \quad d(t, \tau) = z^L(t, \tau) + z^U(t, \tau), \quad \text{если } l(t, \tau) = 0, \quad (3.9)$$

задолжность ликвидируется полностью в момент времени  $T(\tau)$ ,  $(u(t, \tau) = \delta(t - T(\tau)))$ , когда в первый раз нарушится неравенство

$$i(t)\lambda(t, \tau) \int_1^{s(t)} \zeta(\xi)d\xi + D_t p(t) -$$

$$-(\mu + r_2(t))B(t, \tau) - (r_1(t) - r_2(t))l(t, \tau)/m(t, \tau) \geq 0. \quad (3.10)$$

В момент создания фирмы  $t = \tau$  условие (3.8) выполнено,  $l = k$ . Чтобы (3.8) сразу же не нарушилось, достаточно потребовать, чтобы

$$\frac{\partial}{\partial t}(l(t, \tau) - k(t, \tau))|_{t=\tau} \leq 0. \quad (3.11)$$

Из (3.8),(3.6),(3.7) при  $k(t, \tau) = l(t, \tau) = p(\tau)b(\tau)m(\tau, \tau)$ ,  $u(\tau, \tau) = 0$  и  $h(\tau, \tau) = z^U(\tau, \tau)$  по аналогии с [16] мы получим, что в момент создания фирмы должно быть выполнено неравенство

$$r_1(\tau) \leq f(\tau, \nu(\tau), c(\tau), a(\tau)), \quad (3.12)$$

где

$$i(\tau, \nu(\tau), c(\tau), a(\tau)) = \left( \int_1^{s(\tau)} \zeta(\xi)d\xi \right) s(\tau)v(\tau)/(b(\tau)p(\tau)), \quad (3.13)$$

$$b(\tau) = b(\nu(\tau), c(\tau), a(\tau)), \quad (\text{см. (3.1)}),$$

а

$$o(\tau, \tau) = (p(\tau)(1 - N(\tau)c(\tau)) - g(\tau)a(\tau))/(s(\tau)v(\tau)), \quad (\text{см. (3.3)}).$$

Неравенство (3.12) можно рассматривать как условие на текущую норму процента  $r_1(t)$  за кредит, при выполнении которого выгодно создавать новую производственную мощность, использующую технологию  $(\nu, c, a)$ . При такой норме процента предъявляется спрос на кредит. Банковская система заинтересована выдать кредит под наибольший процент. Поэтому можно считать, что процент устанавливается на уровне

$$r_1(t) = \max_{\nu, c, a} f(t, \nu, c, a). \quad (3.14)$$

Тогда, по необходимости, новые фирмы должны использовать выгодную при этом проценте технологию (будем считать, единственную)

24

Приведенные выше соотношения определяют выпуск фирмами продукта, выброс загрязнения, затраты труда и сырья, если будут заданы цены продукта и сырья  $p, g$ , ставка заработной платы  $s$ , депозитный процент  $r_2$  и предложение кредитов  $\phi^I$ .

Отметим, что предположение о наличии резервных мощностей в экономике весьма существенно. Попытка воспроизвести траекторию модели с резервными мощностями моделью, где они не учитываются [15], успехом не увенчалась. Описание, не учитывавшее резервных мощностей [15, 18], естественно применять для описания бурно растущих экономических систем, подобных тем, которые имеются в настоящие времена в странах Юго-Восточной Азии. Описание же с учетом резервных мощностей представляется более пригодным для экономик США, стран Западной Европы и республик бывшего СССР.

#### 4. Модель экономики

Функционирование банковской системы описано так же, как в [18, 15, 16], предполагая, что банковские активы складываются из резерва  $R$  и задолженности фирм  $L$ , а пассивы — из депозитов собственников фирм  $D$ . Как и в [18, 15, 16], из управлений банковских балансов и условий резервирования можно определить предложение кредитов  $\phi^I$ , депозиты собственников  $D$  и депозитный процент  $r_2(t)$  в зависимости от эмиссии платежных средств  $E(t)$  и нормы резервирования депозитов  $\xi$ :

$$\phi^I = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{m(t,\tau) > 0} l(t, \tau) d\tau + E(1 - \xi)/\xi, \quad (4.1)$$

$$dD/dt = E(t)/\xi, \quad r_2 = \left( E(1 - \xi)/\xi - \int_{-\infty}^t d(t, \tau) d\tau \right) / D. \quad (4.2)$$

Как и в [18, 15, 16], отрицательность величины  $\phi^I$  означает крах банковской системы. Единственное отличие от [18, 15, 16] состоит в том, что эмиссия платежных средств мы считаем пропорциональной суммарному выпуску продукта  $Y(t) = E(t) + p(t)Y(t)$ . Коэффициент  $p$  и норма резервирования  $\xi$  являются параметрами модели.

Соотношения из п.3 позволяют суммированием по фирмам (интегрированием по  $t$  от  $-\infty$  до 0) вычислить суммарные продажи продукции  $Y$  (как за счет производства  $Y^L$ , так и за счет демонстрации мощностей  $Y^R$ ), затраты труда  $R^L$ , затраты сырья  $R^W$ , выбросы загрязнения  $Q^N(t)$ , фонд заработной платы  $\Phi^W(t)$ , поступления налога на загрязнение  $\Phi^N(t)$  и доход государства от продажи ресурса  $\Psi^R(t)$ , если заданы цена продукта  $p$ , цена сырья  $g$  и ставка заработной платы  $s$ . Эти величины устанавливаются в процессе рыночного взаимодействия.

Цена на продукт определяется из условий равновесия рынка товаров

$$p(t)Y(t) = \Psi^R(t) + \Psi^G(t) + \Phi^I(t). \quad (4.3)$$

Здесь  $\Psi^R(t), \Psi^G(t)$  — расходы трудящихся и государства, которые мы опишем ниже. Расходы на восстановление ресурса определяют объем посадок на единицу площи в единицу времени

$$\dot{A}(t) = \Phi_H^W(t)/(p(t)\delta^W A^W), \quad (5.1)$$

где  $\delta^W$  — коэффициент фондоемкости посадок, а  $A^W$  — площадь лесов. Объем вырубки на единицу площи определяется совокупным спросом производства и услуг

$$\dot{A}(t) = R^W(t)/A^W. \quad (5.2)$$

Изменение комплексного показателя загрязнения описывается уравнением

$$P(t) = (Q^P(t) - d^P \Phi_H^W(t)/p(t))/A^W, \quad P \geq 0, \quad (5.3)$$

где  $Q^P(t)$  — суммарные выбросы загрязнения в момент времени  $t$ , а  $d^P$  — удельная производительность расхода продукта на очистку.

Будем полагать, что ставка налога на загрязнение  $N(t)$  изменяется в соответствии с уравнением

$$dN/dt = (1/\Delta_N)N(t)(P(t)/P_0(t) - 1)\theta(P(t) - P_0(t)), \quad (5.4)$$

в котором  $\Delta_N$  определяет характерное время изменения ставки  $N(t)$ , а  $P_0(t)$  — предельный уровень загрязнения, при превышении которого государство увеличивает налог на загрязнение.

Уравнение (5.4) описывает реакцию общества на экологическую опасность. Параметр  $P_0(t)$  интерпретируется как результат некоторого компромисса между предпринимателями, которые стремятся избежать лежкого роста налога на загрязнение и трудящимися, которые стремятся усилить очистку загрязнения. Из (4.8), (4.9) определяется критический уровень загрязнения  $P^*$ , при котором численность гигантского населения перестает расти:

$$P^*(t) = n_0/(n_0\alpha_n + \alpha_n\gamma_P), \quad (5.5)$$

где  $\gamma_P = (1/P)dP/dt$  — темп роста загрязнения. Величину  $P^*$  можно считать предельным уровнем загрязнения, который согласен терпеть трудящиеся. Процесс сказования интересов трудящихся и предпринимателей описан уравнением

$$dP_0/dt = -(1/\Delta_P)(P_0(t) - P^*(t))\theta(P_0(t) - P^*(t)), \quad (5.6)$$

определенным предельным уровнем загрязнения, на который реагирует государство. Здесь  $\Delta_P$  — величина, определяющая характерное время изменения  $P_0(t)$ , она показывает насколько сильно предприниматели сдерживают снижение предельного

здесь параметр  $\Delta_P$  определяет характерное время изменения цены, а параметр  $W^*$  характеризует некоторый "нормальный" размер биомассы леса,  $W^* \leq W_0$ .

Ставка заработной платы  $s(t)$  быстро растет, когда спрос на труд  $R^L$  превышает его предложение  $\tilde{R}^L(t)$ , и остается неизменной в противном случае (см. [18, 15, 16]):

$$ds/dt = (\tilde{R}^L(t)/R^L(t) - 1)_+ s(t)/\Delta_s, \quad (4.5)$$

где  $\Delta_s$  — постоянная времени.

Чтобы закончить макроэкономическое описание, определим величины расходов государства и трудящихся, а также предложение труда. В соответствии с целями настоящей работы мы считаем, что государственные расходы равны доходам, и учитываем только налог на загрязнение и продажу ресурса в качестве источника доходов государства. Таким образом,

$$\Psi^G = \Phi^N + \Phi^W.$$

Как и в [18, 15, 16], пренебрегаем сбережениями трудящихся и считаем, что они тратят на потребление все свои доходы:

$$\Psi^H = \Phi^R.$$

Считаем, что предложение труда пропорционально численности активного населения  $A^L(t)$  с коэффициентом  $\chi$ , зависящим от уровня потребления  $\omega^R(t)$ :

$$\tilde{R}^L(t) = A^L(t)\chi(\omega^R(t)), \quad 0 \leq \chi(\omega^R) \leq 1, \quad \chi(\omega^R) = \chi_0 \exp(-\alpha_\chi |\omega^R - \omega_0^R|), \quad (4.6)$$

$$\omega^R(t) = s(t)R^L(t)/(p(t)N^L(t)). \quad (4.7)$$

В отличие от [18, 15, 16] учтем демографические последствия загрязнения и считаем, что доля  $\kappa$  активного населения в общей численности  $N^L$  и темп роста общей численности  $n$  зависят от показателя загрязнения  $P$

$$dN^L/dt = n(P(t))N^L(t), \quad n(P) = n_0(1 - \alpha_n P), \quad (4.8)$$

$$A^L(t) = \kappa(P(t))N^L(t), \quad \kappa(P) = \kappa_0 \exp(-\alpha_\kappa P). \quad (4.9)$$

Эти зависимости выражают тенденции роста заболеваемости и смертности при ухудшении природных условий жизни.

#### 5. Регулирование экологических последствий экономического развития

Продукт, купленный государством, используется на очистку от загрязнений и на восстановление ресурса (леса). Предполагается, что на очистку используется часть  $\Phi_H^W(t) = \Phi^N(t)\theta(P(t))$  доходов от налога на загрязнение  $\Phi^N(t)$ , а на восстановление ресурса (посадка леса) часть  $\Phi_H^W(t) = \Phi^W(t)\theta(\tilde{W} - W(t))$  доходов от продажи ресурса  $\Phi^W(t)$ . Если в силу этих соотношений у государства оказывается избыточные средства, они направляются на восстановление ресурсов.

за цели, не связанные с природной средой и не влияющие на состояние экономики. Расходы на восстановление ресурса определяют объем посадок на единицу площи в единицу времени

$$\dot{A}(t) = \Phi_H^W(t)/(p(t)\delta^W A^W), \quad (5.1)$$

где  $\delta^W$  — коэффициент фондоемкости посадок, а  $A^W$  — площадь лесов. Объем вырубки на единицу площи определяется совокупным спросом производства и услуг

$$\dot{A}(t) = R^W(t)/A^W. \quad (5.2)$$

Изменение комплексного показателя загрязнения описывается уравнением

$$P(t) = (Q^P(t) - d^P \Phi_H^W(t)/p(t))/A^W, \quad P \geq 0, \quad (5.3)$$

где  $Q^P(t)$  — суммарные выбросы загрязнения в момент времени  $t$ , а  $d^P$  — удельная производительность расхода продукта на очистку.

Будем полагать, что ставка налога на загрязнение  $N(t)$  изменяется в соответствии с уравнением

$$dN/dt = (1/\Delta_N)N(t)(P(t)/P_0(t) - 1)\theta(P(t) - P_0(t)), \quad (5.4)$$

в котором  $\Delta_N$  определяет характерное время изменения ставки  $N(t)$ , а  $P_0(t)$  — предельный уровень загрязнения, при превышении которого государство увеличивает налог на загрязнение.

Уравнение (5.4) описывает реакцию общества на экологическую опасность. Параметр  $P_0(t)$  интерпретируется как результат некоторого компромисса между предпринимателями, которые стремятся избежать лежкого роста налога на загрязнение и трудящимися, которые стремятся усилить очистку загрязнения. Из (4.8), (4.9) определяется критический уровень загрязнения  $P^*$ , при котором численность гигантского населения перестает расти:

$$P^*(t) = n_0/(n_0\alpha_n + \alpha_n\gamma_P), \quad (5.5)$$

где  $\gamma_P = (1/P)dP/dt$  — темп роста загрязнения. Величину  $P^*$  можно считать предельным уровнем загрязнения, который согласен терпеть трудящиеся. Процесс сказования интересов трудящихся и предпринимателей описан уравнением

$$dP_0/dt = -(1/\Delta_P)(P_0(t) - P^*(t))\theta(P_0(t) - P^*(t)), \quad (5.6)$$

определенным предельным уровнем загрязнения, на который реагирует государство. Здесь  $\Delta_P$  — величина, определяющая характерное время изменения  $P_0(t)$ , она показывает насколько сильно предприниматели сдерживают снижение предельного

#### 6. Долгосрочные последствия различных стратегий регулирования взаимодействия экономики и природной среды

Все приведены основные результаты, полученные при численных экспериментах с моделью. Нормы затрат ресурсов в численных экспериментах мы считаем постоянной и одинаковой для всех фирм. Тогда технология, используемая вновь создаваемой фирмой, определяется из (3.15) однозначно.

При расчетах были принятые следующие начальные данные и значения параметров модели:  $P_0(0) = 100$ ,  $\alpha_0 = 0.5$ ,  $N(0) = 0.025$ ,  $P(0) = 1.57$ ,  $s(0) = 4.5$ ,  $\Delta_P(0) = 100$ ,  $\Delta_s = 20$ ,  $\Delta_N = 20$ ,  $\Phi_H^W(0) = 4$ ,  $a = 0.015$ ,  $\alpha^* = 0.005$ ,  $\alpha_n = 0.005$ ,  $\kappa_0 = 0.7$ ,  $\alpha_\kappa = 0.01$ ,  $\chi_0 = 0.223$ ,  $\beta = 0.05$ ,  $\epsilon = 0.11$ ,  $r = 0.015$ ,  $c_0 = 0.5$ ,  $v_0 = 0.06$ ,  $\alpha_s = 0.35$ ,  $\omega_0 = 1$ ,  $\chi_0 = 0.95$ ,  $\alpha_\kappa = 0.01$ ,  $\omega_0^R = 2$ .

Приступая к описанию результатов численных экспериментов с моделью, обратим внимание на представление результатов расчетов. Они в значительной степени унифицированы. На всех графиках по оси абсцисс отложено время, как правило, с года 0 по год 100. Год 0 соответствует началу расчета, год 100 или при этом окончанию расчета. Если на осях ordinat обычно расположено несколько показателей состояния экосистемы на всех рисунках приведены в процентах от стационарных значений этих величин (которые служат одновременно начальными значениями величин). Цифры справа от оси ordinat означают соответствующие единицы для каждой переменной.

Типичный пример траектории модели со сбалансированными начальными данными изображен на рис.1. Отметим, что система уравнений экономической части модели (если исключить взаимодействие с экосистемой) допускает режим сбалансированного экспоненциального роста. В этом режиме экстенсивные переменные: мощность, выпуск, занятость и т.д. — растут с постоянным темпом, а интенсивные переменные: цены, проценты, средние нормы затрат — постоянны во времени. Структура мощностей в режиме экспоненциального роста стационарна. Параметры сбалансированного роста, в том числе его темп, определяются параметрами модели. Сбалансированному росту соответствуют специальные начальные данные. Если начальные данные немного отличаются от сбалансированных, как на траектории, изображенной на рис.1, в модели возникает режим колебаний около сбалансированного роста, который хорошо отражается фазами реального делового цикла классической рыночной экономики: застой, рост, бурный рост, спад, (см. [19]). Этот режим и виден на рис.1 на первой половине расчетного периода (до 50 лет), когда еще не тащутся ограничения ресурсов и последствия загрязнения.

Видно, однако, что загрязнение  $P$  постепенно растет (рис.1a), а экосистема леденеет (рис.1b). Начиная с 50-го года становится заметен рост цены на сырье  $g$ , вызванный истощением природного ресурса  $W$ , с 60-го года начинает увеличиваться налог на загрязнение, вызванный снижением предельного уровня загрязнения  $P_0$ , а с 65-го года к тому же начинается рост заработной платы  $s$ , вызванный нехваткой предложения трудовых ресурсов, и рост цены на выпускаемую продукцию  $p$  (рис.1a, b, e).

Тем не менее экономика справляется со всеми тремя кризисами, действующими одновременно (экологический, природного ресурса, трудовых ресурсов). Попытки уменьшить налоги на загрязнение  $N$  приводят к созданию новых фирм с технологиями, постепенно уменьшающими выбросы вредных отходов (снижение  $c$ ), это приводит к увеличению фондоемкости  $b$ , увеличение фондоемкости вместе с ро-

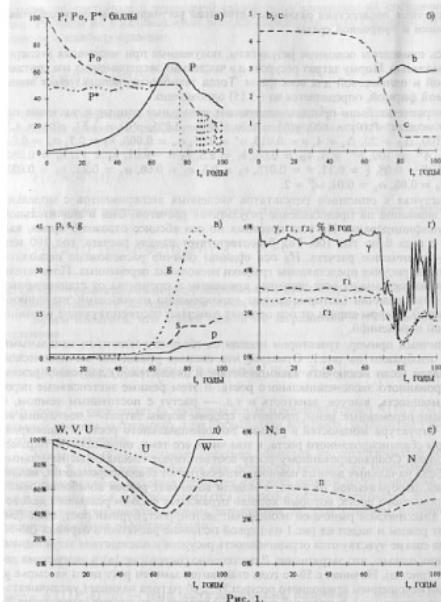


Рис. 1.

80-го года уровень загрязнения вместе с предельным уровнем загрязнения начинает экспоненциально снижаться. Значит, если в обществе возникнет механизм аморганизации (когда при снижении предложения трудовых ресурсов, вызванном ухудшением состояния здоровья населения от загрязнения окружающей среды, снизится общественное требование снижения предельно допустимого уровня загрязнения, и этот предельный уровень в процессе согласования с управляющими фирмами постепенно снижается), то повышение налога на вредные выбросы приведет к переходу вновь создающихся фирм на более чистые технологии. Этот механизм

## Регулирование экологических последствий экономического роста

мической системе выйти из такого сложного кризиса.

Пробные численные эксперименты показали, что если в выражении (5.6) убрать ограничение на рост  $P_0$ , то в плохо сбалансированной экономике накануне экологического кризиса это приводит к переходу новых фирм на "грязные" технологии, в результате чего начинает резко расти показатель загрязнения, и экономическая система не успевает справиться с экологическим кризисом или терпит крах в результате резких колебаний цены. К таким же печальным последствиям (экологический кризис или крах экономической системы), как показали численные эксперименты, может привести возможность снижения налога на вредные выбросы.

На рис.2 представлены некоторые результаты численного эксперимента, в котором проявился механизм формирования предельного уровня загрязнения. Допускалась возможность роста предельного уровня загрязнения  $P_0$ , на который реагирует государство, меняя ставку налога на загрязнение (5.4). Оказалось, что если начальные условия сбалансированы, то экономическая система не разрушается за период времени, для которого проводились расчеты, а вот если допустить небольшое смещение начального состояния от сбалансированного, то экономическая система не справляется с возникающими колебаниями и разрушается. Смещения от сбалансированного начала можно достичь, меняя различные параметры. Различные примеры такого смещения, хотя и для другой модели, можно найти в [15]. Самый существенный структурный параметр в нашей модели — это параметр производственной функции  $\alpha_p$ : чем больше  $\alpha_p$ , тем меньше резервных мощностей имею фирммы. Увеличив немного этот параметр по сравнению с базовым вариантом: положим  $\alpha_p = 0.4$  и получим пуск смещение от сбалансированного начального состояния.

Если допускать рост предельного уровня загрязнения  $P_0$ , то он может подскочить (см. рис.2а). Это приводит к стабилизации на низком уровне предложения трудовых ресурсов (рис.2б). Оно не растет из-за потери рабочего времени вследствие вредных выбросов, несмотря на рост заработной платы. Нехватка трудовых ресурсов приводит к еще большему росту заработной платы, ставка которой  $\gamma$  поднимается в два раза выше, чем в базовом варианте (см. рис.2д). Фирмы, имеющие устаревшие мощности, вынуждены их демонтировать и распродавать, чтобы обеспечить банковское ограничение на кредиты. Это в сочетании с колебаниями, вызванными несбалансированным началом, приводит к колебаниям доли демонтируемых мощностей в выпуске (рис.2е), к резким колебаниям темпа роста  $\gamma$  (рис.2г) и процентов  $t_1, t_2$  (см. рис.2ж). Результат этих колебаний — нестабильность всех фирм (крах экологической системы) и крах банковской системы.

Итак, механизм регулирования, который допускает повышение предельного уровня загрязнения, не годится, поскольку он, даже при небольшом отклонении от сбалансированного роста экономики, приводит к разрушению экономики.

При этом следует заметить, что введение национального механизма ограничения (налог на вредные отходы) может только подниматься, а предельный уровень загрязнения только падать, обеспечивая выживание окружающей среды. Однако экономические параметры регулирования должны быть достаточно мягкими, чтобы выжить и экономическая система. Другими словами, если время терпит (экологические проблемы себя еще не проявили) необходимо сначала выйти на режим роста экономики, достаточно близкий к сбалансированному, а потом уже заниматься экологическими вопросами.

## 7. Заключение

## 1. Удалось построить саморегулирующиеся экономические системы, характеризующиеся

## Регулирование экологических последствий экономического роста

у фирм резервных мощностей, что позволяет гасить колебания макропоказателей, цен и процентов, вызываемые ликвидацией фирм с грязными технологиями.

Сценарные расчеты с моделью подтверждают вывод [15] о том, что возможность пройти между Синий экономического разрыва и Харблью экологического кризиса зависит от исходного состояния экономики. Для того, чтобы экономика, исходящее состояние которой сильно отличается от сбалансированного, могла спасти с ситуацией, необходимо уменьшить скорость роста заработной платы, цены на сырье и налога на вредные отходы производства. Другими словами, чем лучше сбалансирована экономика накануне экологического кризиса, тем более жесткую экологическую политику можно применять, а для несбалансированной экономики экологическая политика должна быть более мягкой.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить признательность Узамиру А.П., Шананину А.А. и Саранче Д.А. за полезные замечания, способствовавшие улучшению изложения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Начало и вечность жизни. — М.: Сов. Россия, 1989, 704с.
2. Моисеев Н.Н. Современный рационализм. — М.: МГИИ КОКС, 1993, 376с.
3. Форрестер Д. Мировая динамика. — М.: Наука, 1978, 167с.
4. Meadows D.L. et al. Limits to Growth in a Finite World. — Cambridge, Mass., 1974.
5. Оленин И.Н., Петров А.А., Постников И.Г. Некоторые результаты исследования модели экономики переходного периода. — М.: ВЦ РАН, 1997, 47с.
6. Nordhaus W. Managing the Global Commons: the Economics of Climate Change. Cambridge MA: MIT Press, 1994.
7. Smulders S. Entropy, Environment, and Endogenous Economic Growth. // International Tax and Public Finance, 1995, v.2, p.319-340.
8. Smulders S. Gradus R. Pollution Abatement and Long-term Growth. // European Journal of Political Economy, 1996, v.12, p.505-532.
9. Khanna M., Zilberman D. Incentives, Precision Technologies, and Environmental Protection. // Ecological Economics. (forthcoming)
10. Romer P. Increasing Returns and Long-run Growth. // Journal of Political Economy, 1986, v.94(5), p.1002-1037.
11. Romer P. The Origins of Endogenous Growth. // Journal of Economic Perspectives, 1994, v.8, p.3-22.
12. Lucas R.E. Jr. On the Mechanics of Economic Development. // Journal of Monetary Economics, 1988, v.22(7), p.3-42.
13. Romello S. Long-run Policy Analysis and Long-run Growth. // Journal of Political Economy, 1991, v.98(4), p.506-521.
14. Петров А.А., Оленин И.Н., Постников И.Г., Шананин А.А. Концепция математического обесценения и информационных технологий оценки экологических последствий экономических решений. — Москва - Переяславль-Залесский, 1990, 61с.
15. Оленин И.Н. Модель государственного управления экологическими последствиями экономического роста. — М.: ВЦ АН СССР, 1991, 43с.
16. Оленин И.Н. Модель жизненного цикла основных фондов и производственная функция, учитывающая резервы мощностей. // Математическое моделирование, 1993, т.7, с.19-33.
17. Тарко А.М., Веденикин М.А., Писаренко И.Ф., Тагаринов Ф.А. Моделирование воздействия промышленных загрязнений на лесные экосистемы. — М.: ВЦ АН СССР, 1987, 19с.

18. Озенев Н.Н., Поступов И.Г. Модель инвестиционной политики фирм в экономической системе рыночного типа. // Математическое моделирование: Процессы в сложных экономических и экологических системах. — М.: Наука, 1986, с.163-173.
19. Озенев Н.Н., Поступов И.Г. Исследование инвестиционной политики фирм в экономической системе рыночного типа. // Математическое моделирование: Методы описания и исследования сложных систем. — М.: Наука, 1989, с.175-200.

Поступила в редакцию 02.03.98г