



подстилки больше критической величины  $V_{cr}$ , и предполагая, что процесс фиксации углерода воздуха частично угнетается загрязнением, получаем

$$Q^0/Q_0^0 = 1 + a^0(U/U_0 - 1) - \beta^0 P Q^0/Q_0^0, \quad (2.5)$$

$$Q^2/Q_0^2 = 1 + a^2(U/U_0 - 1) + b^2(W/W_0 - 1) - \beta^2 P Q^2/Q_0^2 \quad \text{при } V > V_{cr}$$

и  $Q^2 = 0$  при  $V \leq V_{cr}$ .

Следовательно,

$$Q^2/Q_0^2 = [1 + a^2(U/U_0 - 1) + b^2(W/W_0 - 1) - \beta^2 P Q^2/Q_0^2] \theta(V - V_{cr}). \quad (2.6)$$

Здесь  $P$  — комплексный показатель загрязнения,  $a^0, \beta^0, a^2, \beta^2, b^2$  — постоянные, а  $\theta(x) (\theta(x) = 1$  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 заданной долей потока  $Q^2$  (учитывается также угнетение процесса роста загрязнением), а поток углерода из подстилки в гумус  $Q^H$  — фиксированной долей  $Q^H$ :

$$Q^W = (Q_0^W/Q_0^2) Q^2 - \beta^W P Q^W = \alpha^W Q^2 / (1 + \beta^W P), \quad \alpha^W = (Q_0^W/Q_0^2), \quad (2.7)$$

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

Здесь  $\beta^W, \beta^V$  — постоянные. Скорости разложения древесины, подстилки и гумуса считаются пропорциональными соответствующим запасам с учетом того, что два последних процесса могут угнетаться загрязнением:

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

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

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

Здесь  $\beta^U, \beta^V$  — постоянные. Интенсивности сыва подстилки и гумуса также считаются пропорциональными соответствующим запасам

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

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

$$J(W) = J_1 + (J_2 - J_1)(1 - W/W_0)\theta(W_2 - W). \quad (2.13)$$

Здесь  $J_1, J_2, W_2$  — постоянные;  $J_1 < J_2, W_2 < W_0$ . Постоянные  $k^V$  и  $k^U$  легко находятся из условия стационарности экосистемы при отсутствии внешних воздействий (см. (2.3),(2.4)):

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

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

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

$$m(\tau, \tau) = I(\tau) = \Phi^l(\tau) / (p(\tau) b(\nu, c, a)), \quad (3.1)$$

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

где  $b_1, b_2, b_3, b_4$  — постоянные, а  $b(\nu, c, a)$  — коэффициент природной фондемологии, который зависит от технологии, используемой созданной мощностью. Технология характеризуется нормами затрат труда  $\nu$ , выброса загрязнений  $c$  и затрат природного ресурса  $a$  на единицу выпуска 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 ней при этом мы считаем неизменным, то норма затрат труда с возрастом фирмы увеличивается (см. [16]), так что на фирме возрастает  $\tau$  она равна  $\lambda(t, \tau) = \nu(\tau) \exp(\mu(t - \tau))$ . Остальные характеристики технологии ( $c$  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

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

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

Нетрудно показать, что оптимальная нагрузка составляет величину  $\zeta(\rho(t, \tau))$ , где

$$\rho(t, \tau) = (p(t)(1 - N(t)c(\tau)) - g(t)a(\tau)) / (s\lambda(t, \tau)), \quad (3.5)$$

а  $\zeta(\cdot)$  — функция, обратная к производной функции  $K(\cdot)$ ;  $\zeta(1) = 0, \zeta'(\rho) > 0$  или  $\rho > 1$ . В численных экспериментах считалось, что  $\zeta(\rho) = 1 - \exp(-\alpha_2(\rho - 1))$  (см. [16]). При этом можно рассчитать выпуск фирмы  $m(t, \tau)\zeta(\rho(t, \tau))$ , число занятых на ней и ее прибыль  $z^l(t, \tau)$  (см. [16]).

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

$$z^l(t, \tau) + z^v(t, \tau) - h(t, \tau) - d(t, \tau) = 0. \quad (3.6)$$

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

$$\partial q(t, \tau) / \partial t = r_2(t)q(t, \tau) + d(t, \tau), \quad q(\tau, \tau) = 0, \quad (3.7)$$

где  $r_2(t)$  — процент по депозитам. Если фирму считать обществом с ограниченной ответственностью, то надо полагать, что  $d(t, \tau) \geq 0, h(t, \tau) \leq z^l(t, \tau) + z^v(t, \tau)$ .

Теперь обсудим отношения фирмы с банковской системой. В момент создания  $\tau$  фирма имеет балансовую стоимость  $k(\tau, \tau) = \Phi^l(\tau)$  и равную ей задолженность банку  $l(\tau, \tau)$ . В дальнейшем при  $t > \tau$  балансовая стоимость  $k(t, \tau)$  фирмой уменьшается вследствие демонтажа и амортизации с темпом  $\beta$ :

$$\partial k(t, \tau) / \partial t = -\beta k(t, \tau) - u(t, \tau)k(t, \tau). \quad (3.8)$$

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

$$\partial l(t, \tau) / \partial t = r_1(t)l(t, \tau) - h(t, \tau). \quad (3.9)$$

Считается, что кредиты обеспечиваются балансовой стоимостью фирмы, а кредитный счет не используется для накопления сбережений:

$$l \leq l(t, \tau) \leq k(t, \tau). \quad (3.10)$$

а,  $s, r_1, r_2$ . Будем считать, что фирма в первую очередь погашает задолженность, а потом уже накапливает прибыль:

$$h(t, \tau) = z^l(t, \tau) + z^v(t, \tau), \quad d(t, \tau) = 0, \quad \text{если } l(t, \tau) > 0, \\ h(t, \tau) = 0, \quad d(t, \tau) = z^l(t, \tau) + z^v(t, \tau), \quad \text{если } l(t, \tau) = 0, \quad (3.11)$$

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

$$s(t)\lambda(t, \tau) \int_0^{s(t, \tau)} \zeta(\xi) d\xi + B^l(p(t)) - (\mu + r_2(t))B(t, \tau) - (r_1(t) - r_2(t))l(t, \tau) / m(t, \tau) \geq 0. \quad (3.12)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (l(t, \tau) - k(t, \tau))|_{t=\tau} \leq 0. \quad (3.13)$$

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

$$r_1(\tau) \leq f(\tau, \nu(\tau), c(\tau), a(\tau)), \quad (3.14)$$

где

$$f(\tau, \nu(\tau), c(\tau), a(\tau)) = \left( \int_0^{s(\tau, \tau)} \zeta(\xi) d\xi \right) s(\tau) \nu(\tau) / (b(\tau) p(\tau)), \quad (3.15)$$

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

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

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)

Приведенные выше соотношения определяют выпуск фирмы продукта, выброс загрязнения, затраты труда и сырья, если будут заданы цены продукта и сырья  $p, q$ , ставка заработной платы  $s$ , депозитный процент  $r_2$  и предложение кредитов  $\Phi^l$ .

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 учитывающее резервных мощностей [15, 18], естественно применять для описания бурно растущих экономических систем, подобных тем, которые имеются в настоящее время 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 опишем 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 уравнений банковских балансов и условий резервирования можно определить предложение кредитов  $\Phi^l$ , депозиты собственников  $D$  и депозитный процент  $r_2(t)$  в зависимости от эмиссии платежных средств  $E(t)$  и нормы резервирования депозитов  $\xi$ :

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

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

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

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

Цена на продукт определяется из условия равновесия рынка товаров  $p(t)Y(t) = \Phi^R(t) + \Psi^G(t) + \Phi^l(t). \tag{4.3}$

Здесь  $\Phi^R(t), \Psi^G(t)$  — расходы трудящихся и государства, которые мы опишем ниже. Как и в [18, 15, 16], пренебрегаем потребительскими расходами собственников. Считаем, что они сберегают все свои доходы.

Предполагается, что цена на сырье (древесину)  $q(t)$  колеблется в зависимости от запаса биомассы

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

$$\dot{a} = \Phi^W(t) / (p(t)b^W A^W), \tag{5.1}$$

где  $b^W$  — коэффициент фондоёмкости посадок, а  $A^W$  — площадь лесов. Объем вырубки на единицу площади определяется совокупным спросом производства на ресурс

$$\tau(t) = R^W(t) / A^W. \tag{5.2}$$

Изменение комплексного показателя загрязнения описывается уравнением

$$\dot{P}(t) = (Q^P(t) - d^P \Phi^W(t) / p(t)) / A^W, \quad P \geq 0, \tag{5.3}$$

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 силу давления

$$\dot{N}/dt = (1/\Delta_N)N(t)(P(t)/P_0(t) - 1)\theta(P(t) - P_0(t)), \tag{5.4}$$

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 резкого роста налога на загрязнение и трудящимися, которые стремятся усилить очистку загрязнения. Из (4.3), (4.9) определяется критический уровень загрязнения  $P^*$ , при котором численность активного населения перестаёт расти:

$$P^*(t) = n_0 / (n_0 \alpha_n + \alpha_r \gamma_P), \tag{5.5}$$

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

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

определяющим предельный уровень загрязнения, на который реагирует общество. Здесь  $\Delta_P$  — величина, определяющая характерное время изменения  $P_0(t)$ , оно 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 растёт, когда спрос на труд  $R^L$  превышает его предложение  $\tilde{R}^L(t)$ , и остаётся неизменной в противном случае (см. [18, 15, 16]):

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

где  $\Delta_s$  — постоянная времени.

Чтобы закончить макроэкономические описания, 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 источников 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:

$$\Phi^R = \Phi^N.$$

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

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

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

В отличие от [18, 15, 16] учитываем 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  $P$

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

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

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  $\Phi^W(t) = \Phi^N(t)\theta(P(t))$  доходов от налога на загрязнение  $\Phi^N(t)$ , а на восстановление ресурса (посадки леса) часть  $\Phi^W(t) = \Phi^W(t)\theta(W - W(t))$  доходов от продажи ресурса  $\Phi^W(t)$ . Если в силу этих соотношений у государства оказываются избыточные средства, они направляются на развитие производства и занятости.

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

Идея приведены основные результаты, полученные при численных экспериментах с моделью. Норму затрат ресурсов  $a$  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 приняты следующие начальные данные и значения параметров модели:  $P_0(0) = 100, g(0) = 0.5, N(0) = 0.025, p(0) = 1.57, s(0) = 4.5, \omega^R(0) = 100, \Delta_P = 20, \Delta_N = 4, \theta = 0.015, \alpha_\tau = 0.05, \alpha_n = 0.005, \alpha_\kappa = 0.7, \alpha_\chi = 0.01, \Delta_s = 20, A^W = 100, b^W = 4, \delta_P = 0.05, b_1 = 2.5, b_2 = 12, b_3 = 0.985, \alpha = 0.023, \beta = 0.08, \xi = 0.11, \pi = 0.015, c_0 = 0.5, n_0 = 0.06, \alpha_r = 0.35, n_0 = 0.035, \Delta = 1, \chi_0 = 0.95, \alpha_\chi = 0.01, \omega^R_0 = 2$ .

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 другой — окончанию расчета. На оси ординат обычно расположено несколько шкал, если на рисунке представлены графики нескольких переменных. Показатели постоянны экзистенции на всех рисунках приведены в процентах от стационарных значений этих величин (которые служат одновременно начальными значениями этих величин). Цифры справа от оси ординат 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 чувствуются ограниченность ресурсов и последствия загрязнения.

Видно, однако, что загрязнение  $P$  постепенно растет (рис.1а), а экосистема деградирует (рис.1б). Начиная с 50-го года становится заметен рост цены на сырье  $q$ , вызванный истощением природного ресурса  $W$ , с 60-го года начинает увеличиваться налог на загрязнение, вызванный снижением предельного уровня загрязнения  $P_0$  до уровня фактического загрязнения  $P$ , 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.1в, а, е).

Тем не менее экономика справляется со всеми тремя кризисами, действующими одновременно (экологический, природного ресурса, трудовых ресурсов). Подъем цены на сырье увеличивает природоохраняющие мероприятия (посадки деревьев), увеличение налога на загрязнение  $N$  приводит к созданию новых фирм с технологиями, постепенно уменьшающими выбросы вредных отходов (снижение  $c$ ), это приводит к увеличению фондоёмкости  $b$ , увеличение фондоёмкости вместе с ро-

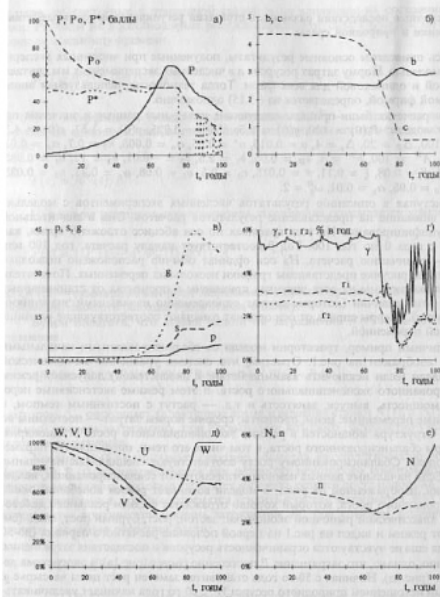


Рис. 1.

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

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 проверялся механизм формирования предельного уровня загрязнения. Допускалась возможность роста предельного уровня загрязнения  $P_0$ , на который регулирует 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  $\alpha_1$ : чем больше  $\alpha_1$ , тем меньше резервных мощностей имеют фирмы. Увеличим немного этот параметр по сравнению с базовым вариантом: положим  $\alpha_1 = 0.4$  и получим нужное смещение от сбалансированного начала.

Если допускать рост предельного уровня загрязнения  $P_0$ , то он может подкочить (см. рис.2а). Это приводит к стабилизации на низком уровне предложения трудовых ресурсов (рис.2б). Оно не растет из-за потерь рабочего времени вследствие вредных выбросов, несмотря на рост заработной платы. Нехватка трудовых ресурсов приводит к еще большему росту заработной платы, ставка которой  $w$  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.2в), к резким колебаниям темпа роста  $\gamma$  (рис.2г) и процентов  $r_1, r_2$  (см. рис.2е). Результат этих колебаний — нерентабельность всех фирм (крах экономической 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 нашим механизмом ограничения (налог на вредные отходы может только подниматься, а предельный уровень загрязнения только падать) обеспечивают выживание окружающей среды. Однако экономические параметры регулирования должны быть достаточно мягкими, чтобы выжила 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 саморегулирующую экономическую систему, способную

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

3. Сценарные расчеты с моделью подтверждают вывод [15] о том, что возможность пройти между Сциллой экономического развала и Хариддой экологического кризиса зависит от исходного состояния экономики. Для того, чтобы экономика, исходное состояние которой сильно отличается от сбалансированного, могла справиться с ситуацией, необходимо уменьшить скорости 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 Уздемиру А.П., Шананину А.А. и Саранчу 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.: МГВР КОКС, 1995, 376с.
3. Фоллмер Д. Мировая динамика. — М.: Наука, 1978, 167с.
4. Meadows D.L. et al. Limits to Growth in a Finite World. — Cambridge, Mass., 1974.
5. Ознец Н.Н., Петров А.А., Поспелов 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. Rebelo S. Long-run Policy Analysis and Long-run Growth. // Journal of Political Economy, 1991, v.99, p.500-521.
14. Лотов А.В., Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А.А. Концепция математического обеспечения новых информационных технологий: оценки экологических последствий экономических решений. — Москва - Переславль-Залесский, 1990, 61с.
15. Ознец Н.Н. Модель государственного регулирования экологических последствий экономического роста. — М.: ВЦ АН СССР, 1991, 43с.
16. Ознец Н.Н. Модель жизненного цикла основных фондов и производственная функция, учитывающая резервы мощностей. // Математическое моделирование, 1995, т.7, № 7, с.19-33.
17. Тарко А.М., Ведюшкин М.А., Писаренко Н.Ф., Татарников Ф.А. Моделирование воздействия промышленных загрязнений на лесные экосистемы. — М.: ВЦ АН СССР, 1987, 19с.

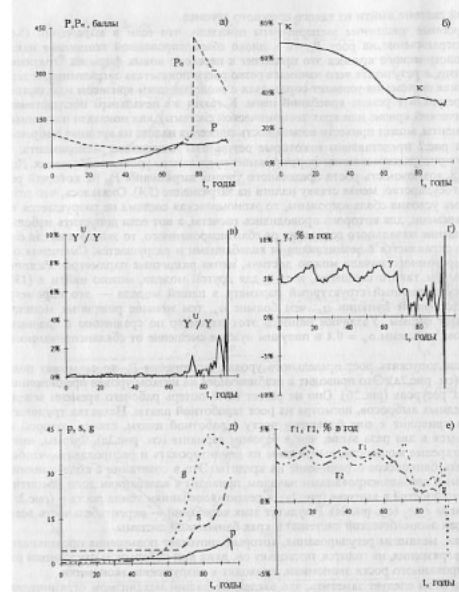


Рис. 2.

ти исходных состояний экономики. Этот механизм по действию похож на рыночный механизм формирования заработной платы на рынке трудовых ресурсов: если заработная плата может только расти, то предельно допустимому уровню загрязнения, как оказалось, должно быть позволено только снижаться, если мы не хотим пойти в экологический кризис.

2. Предложенный механизм действует даже в том случае, когда кризис загрязнения окружающей среды действует наряду с сырьевым кризисом (рост цен на сырье из-за уменьшения восстановимого природного ресурса) и кризисом, вызванным заработной платой активной ча-

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

Поступила в редакцию 02.03.98