

УДК 519.86

## РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА

© Н.Н.Оленев, А.А.Петров, И.Г.Поспелов

Вычислительный Центр РАН, Москва

Предложена эколого-экономическая модель с рыночными механизмами регулирования производства, обмена и распределения. Для описания процессов в природной среде использована упрощенная модель лесной экосистемы под внешними воздействиями. В основе описания процессов в экономике лежит модель жизненного цикла основных фондов с учетом резервных мощностей. Предполагалось, что государство формирует экологические фонды, взимая налог с выброса вредных отходов и получая плату за используемый в производстве природный ресурс. Предпринята попытка построить описание механизмов общественного воздействия на экономический рост, который обеспечивал бы благоприятную эволюцию экосистемы.

## ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF ECONOMIC GROWTH

*N.N.Olenev, A.A.Petrov, I.G.Pospelov* Computing Center of Russian Academy of Sciences, Moscow

An ecologo-economic model with market mechanisms of production regulation, exchange, and distribution is offered. For the description of the environmental processes a simplified model of wood ecosystem under external influence is used. The basis for 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 receiving a payment for a natural resource used in production. An attempt to construct the description of mechanisms of public influence on economic growth which would provide favorable evolution of the ecosystem is undertaken.

### 1 Устойчивое развитие и окружающая среда

Экономическая деятельность людей воздействует на состояние природных систем — обостряется проблема загрязнения окружающей среды, истощаются запасы традиционных сырьевых ресурсов. Истощение и изменение производственных качеств природных ресурсов отражается на изменении показателей экономических механизмов регулирования — цены, ренты и т.п. Все взаимосвязано, экономика — органическая часть биосферы, а освоенная человеком биосфера — составная часть экономики. Не случайно поэтому появилась идея устойчивого развития экономики, согласованного с ресурсами биосферы (sustainable development). Подобную идею по-существу высказывал еще В.И.Вернадский в своем учении о ноосфере, ставя вопрос "о перестройке биосферы в интересах свободно мыслящего человечества как единого целого" [1]. В наши дни учение В.И. Вернадского о ноосфере развил Н.Н.Моисеев, разработав принцип коэволюции 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 [3] при обсуждении перехода экономики России к устойчивому развитию показана важность учета перестройки экономических отношений при этом переходе. В [4] изучается оптимальная экономическая политика в

ответ на изменение климатических условий и при этом обнаружено, что темп устойчивого выпуска продукции и темп снижения выброса углекислого газа более чувствительны к технологическим параметрам, чем к параметрам изменения климата или параметрам, описывающим ущерб.

Тем не менее, параметры, описывающие технологические изменения, в большинстве работ по оценке влияния экономических стратегий на качество окружающей среды являются экзогенными неэкономическими переменными [5]. Это препятствует пониманию коэволюции экономической и экологической систем. Долгосрочные темпы роста и эндогенные факторы, которые определяют эти темпы и технологические изменения, лежат в фокусе ряда работ по новой теории роста (см., например, [6, 7, 8, 9]). Эта новая теория роста лежит в основе описания экономических процессов в той небольшой части западной литературы по взаимодействию экономического роста и окружающей среды, в которой экономический рост определяется эндогенно (см., например, [10, 11]).

В [12] предполагается, что оценка экологических последствий экономических решений может быть сделана на основе моделей, в совокупности описывающих сложную систему экономических и экологических процессов. Описания воздействий на природные системы входят составной частью в описания технологий производства. Экологические кризисы, по существу, выявляют несоответствие экономических структур состоянию природных систем и разрешаются перестройкой экономических структур. Ухудшение общественных благ — климата, качества атмосферы, воды и т.д. порождают проблему экологического мониторинга и конструирования общественных механизмов контроля качества общественных благ. Чтобы разобраться в иерархии общественных механизмов регулирования процессов надо оценивать характерные масштабы времени разных процессов и выстраивать их иерархию. Настоящая работа продолжает исследования, начатые в [13], и также, как и [13], развивает, конкретизирует положения "Концепции математического обеспечения новых информационных технологий оценки экологических последствий экономических решений" [12]. В настоящей работе ставилась цель реализовать некоторые из этих идей на самых простых моделях. Здесь построено совместное описание экономических процессов и экологических процессов. Описаны процессы производства, эволюции технологической структуры производства и экономические механизмы регулирования этих процессов. Описания содержат и воздействия производства на природную систему (выбросы вредных отходов, использование природных ресурсов, восстановление природных ресурсов), и воздействия государства на экономические процессы (налоги на вредные выбросы, создание экологических фондов) и на экологические процессы (затраты на восстановление природных ресурсов). От существующей литературы по экономическому росту и проблемам окружающей среды настоящая работа отличается в трех ключевых аспектах.

1. Для того чтобы технологические параметры экономического роста в модели определялись эндогенно, необходимо учитывать внутреннюю структуру моделируемой системы. При этом макросоотношения нужно стремиться выводить из исходного микроописания [14]. Тогда в единой модели можно сочетать и теорию экономического роста и теорию равновесия. Например, в эколого-экономической модели [13] в основе описания экономических механизмов регулирования лежит модель инвестиционной политики фирм в экономической системе рыночного типа [15]. В модели [15] производственные мощности рентабельных фирм загружены полностью, вновь создающиеся мощности обладают наилучшей из известных технологий, а чтобы избежать неестественных колебаний макропоказателей устаревшие мощности распродаются постепенно. Тем не менее, экономика довольно резко реагировала на изменение цен и налога на загрязнение. При таком описании не удалось

найти механизма саморегулирования экономических воздействий на экологию, который обеспечивал бы всегда экономически осмысленное поведение модели. Для нормальных взаимоотношений экологии и экономики, оказалось необходимым упреждающее увеличение налогообложения "грязных" технологий. Это указывает на необходимость разработки более чутких процедур экологического регулирования и использования более совершенных моделей экономики, описывающих структурные изменения. В настоящей работе при описании экономических механизмов регулирования сделан переход от модели [15] к модели, описывающей жизненный цикл фирм с резервными мощностями [16]. Это позволяет последовательнее с точки зрения "Системного анализа развивающейся экономики" [14] описать процессы загрузки, создания и демонтажа производственных мощностей. При этом распределение производственных мощностей по возрасту начала функционирования и по технологиям оказывается менее крутым, что дает возможность просчитывать более естественные сценарии с невысоким темпом роста валового выпуска. Устаревшие производственные мощности в [16] демонтируются с целым букетом технологий, а именно: мощности демонтируются вместе с ликвидацией фирмы, для которой выполняется соответствующее условие оптимальности. Благодаря этому при расчетах удается избежать неестественных колебаний макропоказателей: чем больше резервных мощностей имеют фирмы, тем менее выражены колебания.

2. В отличие от существующей литературы по взаимодействию экономического роста и окружающей среды [10, 11] в настоящей работе используется не просто дифференциальное уравнение изменения некоего абстрактного запаса качества природной среды. Но качество природной среды определяется структурной моделью экосистемы. А именно, для описания процессов в природной среде использована модификация модели лесной экосистемы, которая содержит описание воздействий атмосферных выбросов металлургических комбинатов [17]. Важно было иметь описание эволюции экосистемы под внешними воздействиями, которое качественно верно отражало бы процессы естественной регенерации и дегенерации системы, их характерные временные масштабы. Всем этим требованиям удовлетворяет модель лесной экосистемы [17], упрощенный динамический вариант которой положен в основу описания окружающей среды в нашей модели. Сделан первый шаг от потоковой модели типа Форрестера к модели системного анализа (так как это понимается в [14]): потоковая модель записана в виде, в котором всем параметрам удается дать четкую физическую интерпретацию. При этом удалось уменьшить число используемых параметров, сохранив все качественные и практически все количественные свойства исходной модели.

3. В настоящее время процесс принятия решений по экологическим проблемам в большей степени определяется политическими механизмами, поэтому представляется, что достижение компромисса в этой области существенно облегчится, если удастся предложить саморегулирующийся механизм по типу рынка для регулирования конфликтов, возникающих при увеличении загрязнения окружающей среды. В настоящей работе предложено описание механизма общественного воздействия на предельно допустимый уровень загрязнения, при превышении которого государство повышает экологический налог на выбросы вредных отходов. Терпимый для всего населения уровень загрязнения такой, при котором численность экономически активной части населения не снижается. А предельно допустимый уровень определяется процедурами согласования интересов предпринимателей и экономически активной части населения.

Таким образом, получено исходное описание эколого-экономической системы, эволюция которой определяется рыночными механизмами регулирования производства, обмена и распределения. Но это описание содержит параметры государственного воздействия на

характер эволюции, что дает возможность исследовать механизмы регулирования экологических последствий экономического роста в условиях рыночной экономики.

Специально заметим, что наша задача — исследовать механизмы регулирования экологических последствий экономического развития. С этой точки зрения несущественно, описывает ли экологический блок лесную экосистему или какую-то другую — нас интересуют качественные особенности эволюции. Поэтому не следует относиться к результатам, как к исследованию промышленных воздействий на лесные экосистемы — экономический блок модели не был идентифицирован с необходимой для этого точностью. Если же при описании окружающей среды используются термины, принятые в [17], — то только для удобства изложения.

Основная задача была в том, чтобы исследовать качественные особенности отдаленных последствий экономических решений на состояние природной среды. Предполагалось, что производство материальных благ сопровождается выбросом вредных отходов, которые в модели описывались переменной "загрязнение". Каждая технология производства характеризовалась величиной выброса загрязнения на единицу продукта, произведенного в единицу времени. Кроме того, предполагалось, что природный ресурс использовался в производстве для выпуска каждой единицы продукта. Следовательно, производство воздействует на эволюцию показателей состояния экосистемы. Они, вообще говоря, характеризуют экологические последствия и дают информацию о необходимости принимать те или иные меры для предотвращения вредных последствий. Описание информированности основных социальных групп относительно состояния природной среды, оценки ими данного состояния среды составляет модель экологического мониторинга.

В построенной модели выделены следующие представляющие различные социальные группы общества экономические агенты: "предприниматели", "трудящиеся", "собственники" и "государство". Теми или иными функциями (или функционалами) от показателей состояния природной среды можно описать их информированность и, в конце концов, поставить задачу об общественном компромиссе и экологическом программировании. Предполагалось, что "государство" имеет информацию об интенсивности загрязнения и взимает экологический налог с добавленной стоимости пропорционально выбросам загрязнения. Система экологического мониторинга моделировалась зависимостью ставки экологического налога от уровня фактического загрязнения и уровня допустимого загрязнения. Последний определяется в результате компромисса между "предпринимателями" и "трудящимися". "Трудящиеся" стремятся снизить уровень загрязнения при уменьшении прироста активной части класса трудящихся, вызванном болезнями. "Предприниматели" сдерживают резкое падение допустимого уровня загрязнения для сохранения достаточных темпов роста экономики. При исчерпании природных ресурсов ниже "равновесного" значения, увеличивается их стоимость и возрастают расходы "государства" на восстановительные работы. "Собственники" фирм добиваются снижения стоимости природных ресурсов при их избытке. "Предприниматели" заинтересованы в достаточно "мягком" изменении стоимости природных ресурсов, чтобы не обанкротиться. Параметры зависимостей варьировались и изучалось влияние этих параметров на эволюцию показателей состояния природной среды. В первую очередь интересовал качественный результат — можно ли построить механизм общественного воздействия на экономический рост, который обеспечил бы благоприятную эволюцию экосистемы.

## 2 Воздействие промышленных загрязнений на экосистему”

Для исследования качественных особенностей эволюции экосистемы возьмем простую модификацию динамического варианта модели лесной экосистемы [17, 13], которая сохраняет качественные свойства исходной модели, и в то же время позволяет дать четкую физическую интерпретацию каждому параметру. При этом мы не меняем сути потоковой модели [17], заменив громоздкие формулы для потоков более простыми. Кроме того, простые формулы позволяют в явном виде сформулировать исходные предположения, что делает модель открытой для критики. Блок ”экосистема” нашей модели описывает кругооборот углерода в лесной экосистеме при внешних воздействиях. В описываемой экосистеме выделены следующие компоненты, в том или ином виде содержащие углерод: растительность травяно-кустарничкового яруса, зеленая фитомасса деревьев, древесина и корни деревьев, подстилка, гумус. Внешние воздействия для рассматриваемой экосистемы задаются показателями, которые будут определяться в экономическом блоке нашей модели: комплексный показатель загрязнения, измеряемый в баллах и объединяющий все промышленные загрязнения действующие на экосистему; а также скорости вырубki и посадки деревьев, описывающие потребление природного ресурса в экономике и восстановление этого ресурса.

Поскольку мы изучаем экологические процессы, характерные временные масштабы которых порядка 10 лет, то можно считать [17], что процессы изменения запаса углерода в зеленой фитомассе травяной растительности и в зеленой фитомассе деревьев суть ”быстрые” процессы. Тогда среднегодовой поток углерода в зеленую фитомассу травяной растительности,  $Q^G$ , равен потоку углерода из нее в подстилку, а поток углерода в зеленую фитомассу деревьев,  $Q^Z$ , делится на поток углерода в древесину и корни,  $Q^W$ , и поток углерода в подстилку,  $Q^Z - Q^W$ .

Скорость накопления углерода в зеленой фитомассе деревьев,  $Q^Z$ , определяется биомассой древесины и корней,  $W$ , запасом питательных веществ в почве,  $U$ , и угнетается загрязнением,  $P$ . А именно, будем считать, что вариация потока  $Q^Z$  относительно стационарного значения этого потока при отсутствии внешних воздействий  $Q_0^Z$  равна взвешенной сумме вариаций запасов  $W$  и  $U$  относительно соответствующих стационарных значений  $W_0$  и  $U_0$  за минусом величины, которая описывает угнетающее действие загрязнения.

$$(Q^Z/Q_0^Z - 1) = a^Z(U/U_0 - 1) + b^Z(W/W_0 - 1) - \beta^Z P Q^Z/Q_0^Z, \quad (2.1)$$

где  $a^Z$  — предельная отдача запаса питательных веществ в почве в накоплении углерода в зеленой фитомассе деревьев при отсутствии загрязнения,  $b^Z$  — предельная отдача биомассы древесины и корней в накоплении углерода в зеленой фитомассе травяной растительности при отсутствии загрязнения,  $\beta^Z$  — норма угнетения загрязнением потока углерода в зеленую фитомассу деревьев. Считаем, что поток углерода в древесину и корни,  $Q^W$ , определяется потоком  $Q^Z$  и, в свою очередь, угнетается загрязнением.

$$Q^W = \alpha^W Q^Z - \beta^W P Q^W = \alpha^W Q^Z / (1 + \beta^W P). \quad (2.2)$$

Здесь  $\alpha^W = Q_0^W/Q_0^Z$  — отношение соответствующих стационарных потоков при отсутствии внешних воздействий, а  $\beta^W$  — норма угнетения загрязнением потока углерода в древесину и корни. Считаем, что интенсивность отмирания древесины и корней деревьев,  $Q^K$ , пропорциональна их биомассе,  $W$ .

$$Q^K = k^K W. \quad (2.3)$$

Здесь  $k^K = Q_0^W/W_0$  — отношение стационарной скорости накопления углерода в древесине и корнях при отсутствии внешних воздействий,  $Q_0^W = Q_0^K$ , к стационарной биомассе древесины и корней при отсутствии внешних воздействий,  $W_0$ . Тогда запас углерода в древесине и корнях деревьев (биомасса лесной растительности) определяется уравнением

$$dW/dt = Q^W - Q^K + S - F, \quad (2.4)$$

где указаны внешние воздействия: скорость посадки деревьев,  $S$ , и скорость вырубki древесины,  $F$ .

Скорость накопления углерода в зеленой фитомассе травяной растительности,  $Q^G$ , определяется запасом питательных веществ в почве,  $U$ , и угнетается загрязнением,  $P$ .

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

где  $a^G$  — предельная отдача запаса питательных веществ в почве в накоплении углерода в зеленой фитомассе травяной растительности при отсутствии загрязнения,  $\beta^G$  — норма угнетения загрязнением потока углерода в зеленую фитомассу травяной растительности. Поток углерода из подстилки в гумус и атмосферу определяется запасом углерода в подстилке,  $V$ , и угнетается загрязнением,  $P$ .

$$Q^H = k^V V - \beta^V P Q^H = k^V V / (1 + \beta^V P). \quad (2.6)$$

Здесь  $k^V$  — положительная постоянная,  $\beta^V$  — норма угнетения загрязнением потока углерода из подстилки в гумус и атмосферу. Тогда запас углерода в подстилке (биомасса подстилки) определяется уравнением

$$dV/dt = Q^G + Q^K + (Q^Z - Q^W) - Q^H - R^V, \quad (2.7)$$

где  $R^V$  — интенсивность смыва подстилки. Последняя пропорциональна биомассе подстилки:

$$R^V = k^V J(W) V, \quad (2.8)$$

где функция  $J(W)$  описывает (блокирующее разрушение почвы) воздействие биомассы лесной растительности.

$$J(W) = J_0 + (J_1 - 0)(1 - W/W_1)\theta(1 - W/W_1), \quad (2.9)$$

Здесь  $W_1$  — некое эффективное значение биомассы лесной растительности ( $W_1 < W_0$ ), а  $\theta(\cdot)$  — функция Хевисайда, определяемая равенствами  $\theta(x) = 1$  при  $x > 0$ ,  $\theta(x) = 0$  при  $x \leq 0$ . Постоянная  $k^V$  легко находится в соответствии с (ref1.7) из условия стационарности при отсутствии внешних воздействий:  $k^V = (Q_0^G + Q_0^Z) / [(1 + J_0) V_0]$ .

Интенсивность смыва гумуса пропорциональна биомассе гумуса:

$$R^U = k^U J(W) U, \quad (2.10)$$

где  $k^U$  — положительная постоянная. Считаем, что поток углерода из подстилки в гумус,  $Q^U$ , есть постоянная доля,  $\alpha^V$ , потока  $Q^H$ .

$$Q^U = \alpha^V Q^H, \quad (\alpha^V < 1). \quad (2.11)$$

Поток углерода из гумуса в атмосферу,  $Q^A$ :

$$Q^A = k^U U - \beta^U P Q^A = k^U U / (1 + \beta^U P), \quad (2.12)$$

где  $\beta^U$  — норма угнетения загрязнением потока углерода из гумуса в атмосферу. Уравнение изменения запаса углерода в гумусе (биомасса гумуса),  $U$ , имеет вид:

$$dU/dt = Q^U - Q^A - R^U. \quad (2.13)$$

Постоянная  $k^U$  легко находится из условия стационарности при отсутствии внешних воздействий:  $k^U = \alpha^V (Q_0^G + Q_0^Z) / [(1 + J_0)^2 V_0]$ .

Ограниченность площадей, занятых лесом, выражается условием

$$0 \leq W \leq W_0, \quad (2.14)$$

в котором  $W_0$  задает предельную величину биомассы лесов.

Заметим, что подстилка имеет важное значение для роста древесной растительности. Поэтому выражение (2.1) для потока  $Q^Z$  справедливо, только если  $V \geq V_-$ , где  $V_-$  задает пороговое значение биомассы подстилки. Если же  $V < V_-$ , то  $Q^Z = 0$ , т.е. древесная растительность не возобновляется.

Прежде чем использовать блок "Экосистема" в модели, с ним в автономном режиме были проведены численные эксперименты, которые показали достаточную обоснованность примененного упрощения в нашем случае. Показатели внешних воздействий задавались непосредственно: приравнивались нулю или указанным ниже значениям.

Числовые значения всех параметров исходной модели были определены в [17] при идентификации модели на основании результатов измерений, проведенных в двух районах сильного промышленного загрязнения, расположенных в зонах северной и южной тайги. Параметры используемого здесь упрощенного варианта модели подбирались таким образом, чтобы соответствовать данным того варианта исходной модели [17], который использовался в [13]. Не имея точных числовых данных для выходных показателей, по которым идентифицировалась исходная модель (результаты идентификации в [citeTarko представлены графически), мы используем для формирования таких выходных показателей идентифицированный вариант модели [13]. Во всем остальном процедура подбора параметров нашей модели напоминает процедуру идентификации исходной модели. Только мы находимся в идеальном для идентификации положении, когда мы можем сформировать столько "статистических" данных, сколько захотим. Надо только помнить, что исходная модель [17] идентифицировалась по четырем экспериментальным точкам, в которых комплексный показатель загрязнения,  $P^T$ , измерялся в баллах от 0 до 5. Мы используем другой показатель загрязнения,  $P$ , который связан с показателем [17, 13] однозначной формулой  $P = P^T 2^{P^T}$ , определенной в результате идентификации. Например, пять баллов по шкале загрязнения [17] соответствует 160 баллам по нашей шкале.

Для сравнения двух моделей выберем стационарные значения показателей при отсутствии внешних воздействий для нашей модели на том же уровне, что и в [citeOlenev91:  $Q_0^G = 0.2$ ,  $Q_0^Z = 0.4$ ,  $W_0 = 10$ ,  $V_0 = 1$ ,  $U_0 = 4$ ,  $Q_0^W = 0.24 (= \alpha^W Q_0^Z)$ ,  $J_0 = 0.1$ . Кроме того, на том же уровне, что и в [13] выберем значения параметров  $V_- = 0.08$  и  $\alpha^V = 0.1$ . Остальные параметры нашей модели отличаются от параметров исходной модели по смыслу и были определены в результате сравнения выходных показателей обеих моделей:  $a^G = 0.9$ ,  $a^Z = 0.7$ ,  $b^Z = 0.13$ ,  $\beta^G = 0.053$ ,  $\beta^Z = 0.065$ ,  $\beta^W = 0.0019$ ,  $\beta^V = 0.007$ ,  $\beta^U = 0.0009$ ,  $J_1 = 1.4$ ,  $W_1 = 2.1$ . Заметим, что общее число независимых параметров в сравнении с [13] удалось сократить с 26 до 19.

На Рис.1 показана динамика следующих показателей лесной экосистемы под влиянием внешних воздействий в процентном отношении к стационарным значениям этих показателей: биомасса лесной растительности,  $W$ , биомасса подстилки,  $V$ , биомасса гумуса,  $U$ .

На всех графиках этого и последующих рисунков по оси абсцисс отложено время в годах. Показатели, рассчитанные с помощью нашей модели, указаны жирной кривой. Для сравнения тонкой кривой приведены показатели, рассчитанные с помощью модели [17, ?]. Видно, что качественное поведение показателей практически не меняется от вида модели.

На Рис.1 а)-в) приведены показатели экосистемы при постоянных значениях показателя загрязнения  $P = 2, 8, 24, 64$  (что соответствует показателю  $P^T = 1, 2, 3, 4$ ). Видно, что показатели двух сравниваемых моделей практически не отличаются не только качественно, но и количественно (например, максимальное отклонение нашей модели от модели [17, 13] по биомассе лесной растительности равно 0.7 проводилась именно по экспериментальным точкам с различным уровнем загрязнения, причем максимальное отличие расчета от эксперимента превышало 10(см. Рис.3 [17]). Так что графики Рис.1 а)-в) дают основание утверждать, что наш упрощенный вариант модели идентифицирован хорошо.

На Рис.1 г)-е) приведены показатели экосистемы при постоянной величине скорости вырубки деревьев  $F = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ . Здесь количественные различия возникают по биомассе подстилки и гумуса для высоких скоростей вырубки деревьев через 100 лет от начала расчета, когда биомасса лесной растительности снижается ниже предельного уровня  $W_1$  и начинает действовать усиление смыва. Надо заметить, что такая ситуация в [17] не идентифицировалась и поэтому количественное различие ничего не говорит о качестве нашей модели, а качественное поведение нашей модели не отличается от [17]. В [17, 13] вместо нашей функции  $J(W)$  (2.9) описывающей блокирующее разрушение почвы воздействием биомассы лесной растительности использовалась функция  $J(x)$  от "эффективной" биомассы, в которой складывалась взвешенная сумма относительных величин для запаса  $W$  и потока  $Q^G$ , что нехорошо с точки зрения интерпретации величин (физики так не поступают).

На Рис.1 ж)-и) показаны процессы восстановления лесной экосистемы после мгновенной вырубки 25, 50, 75, 99поведении показателей моделей действует только для случая восстановления после вырубки 99стационарного примерно за 200 лет. Здесь также следует заметить, что процессы восстановления не идентифицировались в исходной модели.

Итак, качественное поведение упрощенного варианта модели лесной экосистемы не отличается от поведения исходной модели, а количественные различия возникают только в ситуациях, которые в исходной модели не идентифицировались. Поэтому можно считать, что мы ничего не теряем переходя от исходной модели со сложным и малоубедительным описанием потоков к более простой модели, в которой параметрам удается дать четкую интерпретацию.

### 3 Жизненный цикл основных фондов и промышленные загрязнения

Будем рассматривать хозяйство, в котором производится единственный однородный продукт, а в производстве затрачивается однородная рабочая сила и единственный природный ресурс. Производством управляют мелкие фирмы, которые продают продукт по единой текущей цене  $p(t)$ , нанимают рабочую силу по единой ставке заработной платы  $s(t)$ , покупают природный ресурс по единой цене  $g(t)$ . За выбросы вредных отходов фирмы выплачивают государству налог  $N(t)$  на добавленную стоимость пропорционально выбросам вредных отходов.

Чтобы описать эволюцию технологической структуры производства, будем предполагать, что фирмы могут образовываться и ликвидироваться. При этом учитываем то,



что фирмы имеют резервные мощности. Образующаяся в момент времени  $\tau$  фирма берет в банке кредит  $\Phi^I(\tau)$ . На эти средства она закупает фондообразующий продукт  $X^I(\tau) = \Phi^I(\tau)/p(\tau)$  и создает производственную мощность

$$m(\tau, \tau) = I(\tau) = \Phi^I(\tau)/(p(\tau)b), \quad (3.15)$$

где  $b$  — коэффициент приростной фондоемкости. Считаем, как и в [13], что технологический параметр  $b$  зависит от технологии. Технология характеризуется производительностью труда, экологической чистотой производства и уровнем потребления природного ресурса:

$$b = b(\nu, c, a). \quad (3.16)$$

Здесь  $\nu$  — трудоемкость единицы продукта,  $c$  — норма выхода загрязняющих веществ при выпуске единицы продукта,  $a$  — норма затрат природного ресурса на выпуск единицы продукта. Функцию  $b(\nu, c, a)$  будем считать убывающей по всем переменным, что отражает уменьшение фондоемкости при увеличении нормы затрат труда, нормы выхода загрязняющих веществ и нормы затрат природного ресурса. Если фирма, образующаяся в момент времени  $\tau$ , использует технологию  $\nu(\tau), c(\tau), a(\tau)$ , то  $b = b(\tau) = b(\nu(\tau), c(\tau), a(\tau))$ .

При  $t > \tau$  мощность фирмы уменьшается вследствие физического износа и, кроме того, вследствие демонтажа по решению фирмы. При демонтаже всей мощности фирма ликвидируется. Пусть  $m(t, \tau)$  — мощность фирмы в момент  $t$ ,  $\mu$  — темп выбытия мощности, а  $u(t, \tau) > 0$  — темп демонтажа мощности. Тогда

$$\partial m(t, \tau)/\partial t = -\mu m(t, \tau) - u(t, \tau)m(t, \tau), \quad m(t, \tau) \geq 0. \quad (3.17)$$

Демонтированная мощность продается на рынке наравне с остальным продуктом и приносит фирме доход

$$z^U(t, \tau) = u(t, \tau)B(t, \tau)p(t)m(t, \tau). \quad (3.18)$$

Функция  $B(t, \tau)$  показывает, какому количеству продукта эквивалентна единица демонтированной мощности. Эту функцию будем считать убывающей с возрастом фирмы  $t - \tau$ , чтобы отразить обесценение устаревшего оборудования. Будем считать, что  $B(\tau, \tau) = b(\nu(\tau), c(\tau), a(\tau))$ , т.е. что новое оборудование может быть продано по той же цене, по какой было куплено.

В момент создания  $\tau$  фирма имеет балансовую стоимость основного капитала  $k(\tau, \tau) = \Phi^I(\tau)$  и равную ей задолженность банковской системе  $l(\tau, \tau)$ . В дальнейшем, при  $t > \tau$ , балансовая стоимость  $k(t, \tau)$  фирмы  $\tau$  изменяется в силу уравнения

$$\partial k(t, \tau)/\partial t = -\beta k(t, \tau) - u(t, \tau)k(t, \tau), \quad (3.19)$$

где  $\beta$  — норма амортизации капитала,  $\beta \geq \mu$ . Задолженность  $l(t, \tau)$  фирмы  $\tau$  изменяется в силу уравнения

$$\partial l(t, \tau)/\partial t = r_1(t)l(t, \tau) - h(t, \tau), \quad (3.20)$$

в котором  $r_1(t)$  обозначает норму процента за кредит, а  $h(t, \tau)$  — платежи погашения кредита.

В соответствии с [16] мы считаем, что общее для всех фирм правило определяет, во сколько раз по отношению к базовой возрастает зарплата при использовании сверхурочных работ. Предполагаем, что в результате применения этого правила фонд заработной платы у фирмы, заполнившей долю общего числа рабочих мест, составит  $sK(\zeta)$ . Производная функции  $K$  была названа в [16] дифференциальной надбавкой,  $\rho(\zeta) = K'(\zeta)$ . Согласно [16] выпуск продукции  $y(t, \tau)$  фирмой  $\tau$  определяется равенством  $y(t, \tau) = m(t, \tau)\zeta(\rho(t, \tau))$ ,

где  $\zeta(\rho)$  — одинаковая для всех фирм функция, описывающая загрузку мощностей,  $\zeta(1) = 0$ ,  $\zeta'(\rho) > 0$  при  $\rho > 1$ , а  $\rho = \rho(t, \tau)$  — максимальная дифференциальная надбавка фирмы  $\tau$ .

Выпуск  $y(t, \tau)$  требует затрат живого труда в количестве  $m(t, \tau)\lambda(t, \tau) \int_1^{\rho(t, \tau)} \xi \zeta'(\xi) d\xi$ , где  $\lambda(t, \tau)$  — трудоемкость единицы продукции, и затрат древесины  $a(\tau)y(t, \tau)$ . По-прежнему, считаем, что  $\lambda(t, \tau) = \nu(\tau) \exp(\mu(t - \tau))$ . Считаем, что норма выхода загрязнителя  $c(\tau)$  определяется в момент образования фирмы  $\tau$  и в дальнейшем не меняется. Обозначим налог на единицу загрязнителя  $N(t)$ , тогда выпуск продукта  $y(t, \tau)$  приносит фирме прибыль

$$z^L(t, \tau) = \{p(t)(1 - N(t)c(\tau)) - a(\tau)g(t)\}m(t, \tau)\zeta(\rho) - s(t)m(t, \tau)\lambda(t, \tau) \int_1^{\rho(t, \tau)} \xi \zeta'(\xi) d\xi.$$

Максимальная дифференциальная надбавка  $\rho = \rho(t, \tau)$  определяется условием максимума прибыли [16]:

$$\rho(t, \tau) = \{p(t)(1 - N(t)c(\tau)) - a(\tau)g(t)\} / (s(t)\lambda(t, \tau)), \quad (3.21)$$

так что

$$z^L(t, \tau) = s(t)\lambda(t, \tau)m(t, \tau) \int_1^{\rho(t, \tau)} \zeta(\xi) d\xi. \quad (3.22)$$

Если пренебречь наличностью в кассе фирмы, то текущий финансовый баланс фирмы можно записать в виде

$$z^L(t, \tau) + z^U(t, \tau) - h(t, \tau) - d(t, \tau) = 0. \quad (3.23)$$

Здесь  $d(t, \tau)$  обозначает чистую прибыль фирмы. Считаем, что она распределяется в виде дивидендов между собственниками фирм. Для простоты считаем, что собственники сберегают весь доход  $d(t, \tau)$ , вкладывая его в банковскую систему; тогда депозиты собственников  $q(t, \tau)$  изменяются в силу уравнения

$$\partial q(t, \tau) / \partial t = r_2(t)q(t, \tau) + d(t, \tau), \quad (3.24)$$

в котором  $r_2(t)$  обозначает процент по депозитам. Считаем, что в момент образования фирмы ее собственники не имеют сбережений:  $q(\tau, \tau) = 0$ .

Если фирму считать обществом с ограниченной ответственностью, то надо полагать, что  $d(t, \tau) \geq 0$ . Тогда

$$h(t, \tau) \leq z^L(t, \tau) + z^U(t, \tau).$$

Кроме того, будем считать, что ссудный счет не используется для накопления сбережений, т.е.  $l(t, \tau) \geq 0$ .

Теперь обсудим отношения фирмы с банковской системой. Будем считать, что кредиты обеспечиваются балансовой стоимостью фирмы:

$$l(t, \tau) \leq k(t, \tau). \quad (3.25)$$

В момент создания фирмы это условие выполнено. Чтобы оно сразу же не нарушилось, надо потребовать, чтобы

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

Отсюда следует [1,3,4], что в момент создания фирмы должно быть выполнено условие

$$\begin{aligned} r_1(\tau) &\leq f(\tau, \nu(\tau), c(\tau), a(\tau)) = \\ &= \left( (s(\tau)\nu(\tau)) / (p(\tau)b(\nu(\tau), c(\tau), a(\tau))) \right) \int_1^{\rho(\tau, \tau)} \zeta(\xi) d\xi - \beta. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Это условие можно рассматривать как условие на текущую норму процента  $r_1(t)$  за кредит, при выполнении которого создается новая фирма и, следовательно, предъявляется спрос на инвестиции. Если текущее значение  $r_1(t) > f(t, \nu(t), c(t), a(t))$ , то фирма на этой технологии не создается.

В [16] определена оптимальная стратегия фирмы при постоянных  $p, s, r_1, r_2$ . Экстраполируем эту стратегию также, как и в [?, 13, 16], на случай переменных  $p, s, r_1, r_2$ . Будем считать, что фирма в первую очередь погашает задолженность, а потом уже накапливает прибыль:

$$\begin{aligned} h(t, \tau) &= z^L(t, \tau) + z^U(t, \tau), \quad d(t, \tau) = 0, \quad \text{если } l(t, \tau) > 0, \\ h(t, \tau) &= 0, \quad d(t, \tau) = z^L(t, \tau) + z^U(t, \tau), \quad \text{если } l(t, \tau) = 0, \end{aligned} \quad (3.27)$$

ликвидируется в подходящий момент времени  $T(\tau)$ ,

$$u(t, \tau) = \delta(t - T(\tau)). \quad (3.28)$$

Это — первый момент времени  $t$ , когда нарушится неравенство

$$\begin{aligned} &s(t)\lambda(t, \tau) \int_1^{\rho(t, \tau)} \zeta(\xi) d\xi + B'_t p(t) - \\ &-(\mu + r_2(t))B(t, \tau) - (r_1(t) - r_2(t))l(t, \tau)/m(t, \tau) \geq 0. \end{aligned} \quad (3.29)$$

## 4 Регулирование экологических последствий экономического развития

Продукт  $Y$ , который фирмы поставляют на рынок, складывается из произведенного продукта

$$Y^L = nt_{-\infty}^t y(t, \tau) d\tau \quad (4.30)$$

и продукта, образовавшегося в результате демонтажа мощностей,

$$Y^U = \int_{-\infty}^t u(t, \tau) m(t, \tau) B(t, \tau) d\tau, \quad (4.31)$$

так что  $Y = Y^L + Y^U$ . Спрос на этот продукт предъявляют трудящиеся, доход которых равен заработной плате  $sR^L$ , выплаченной фирмами. Через  $R^L$  обозначено число занятых в производстве [13]:

$$R^L = \int_{-\infty}^t \lambda(t, \tau) m(t, \tau) \left( \rho(t, \tau) \zeta(\rho(t, \tau)) - \int_1^{\rho(t, \tau)} \zeta(\xi) d\xi \right) d\tau, \quad (4.32)$$

где  $\rho(t, \tau)$  — максимальная дифференциальная надбавка (3.21). Кроме трудящихся спрос на этот продукт предъявляют инвесторы, организующие новую фирму. В соответствии с (3.15) они расходуют средства  $\Phi^I$ , взятые в кредит в банковской системе. В дополнение к этому будем считать, что спрос на продукт предъявляет государство для борьбы с загрязнением и для восстановления природного ресурса (леса).

Выбросы загрязнения в момент времени  $t$  составляют

$$Q^P(t) = \int_{-\infty}^t c(\tau)y(t, \tau)d\tau. \quad (4.33)$$

Доход, полученный государством в виде экологических налогов на загрязнение

$$\Phi^N(t) = p(t)N(t)Q^P(t), \quad (4.34)$$

доход, полученный государством от продажи природного ресурса (древесины)

$$\Phi^W(t) = g(t)R^W(t), \quad R^W(t) = \int_{-\infty}^t a(\tau)y(t, \tau)d\tau, \quad (4.35)$$

где  $R^W(t)$  — суммарные затраты природного ресурса. Часть дохода от налогов на загрязнение,  $\Phi_H^N(t) = \Phi^N(t)\theta(P(t))$ , где  $P(t)$  — величина комплексного показателя загрязнения, а  $\theta(\cdot)$  — функция Хевисайда, идет на покупку продукта, используемого для очистных работ. Возможно, что возникнет положительный остаток,  $\Phi_D^N(t) = \Phi^N(t) - \Phi_H^N(t)$ , тогда считаем, что он идет на государственное потребление. Часть дохода от продажи древесины,  $\Phi_H^W(t) = \Phi^W(t)\theta(W_0 - W(t))$ , где  $W_0$  — предельная величина биомассы леса, используется на восстановление леса. Последнее соотношение учитывает факт ограниченности площадей, занятых под леса. Считаем, что остаток  $\Phi_D^W(t) = \Phi^W(t) - \Phi_H^W(t)$  также идет на государственное потребление.

Потребность в древесине (вырубки) на единицу площади

$$F(t) = R^W(t)/A^W, \quad (4.36)$$

а восстановление древесины (посадки деревьев) на единицу площади

$$S(t) = \Phi_H^W(t)/(p(t)b^W A^W), \quad (4.37)$$

где  $b^W$  — коэффициент фондоемкости посадок, а  $A^W$  — площадь лесов.

Изменение комплексного показателя загрязнения будем описывать уравнением

$$P = \left( Q^P(t) - d^P \Phi_H^N(t)/p(t) \right) / A^W, \quad P \geq 0, \text{ label3.12} \quad (4.38)$$

где  $d^P$  — число единиц, на которые уменьшается загрязнение при расходе на очистку единицы продукции.

Функционирование банковской системы опишем также, как в [?, 13, 16]. Предполагаем, что банковские активы складываются из резерва  $R$  и задолженности фирм  $L$ , а пассивы — из депозитов собственников фирм  $D$ :

$$dD/dt = r_2(t)D(t) + \int_{-\infty}^t d(t, \tau)d\tau + E(t). \quad (4.39)$$

В отличие от [?, 13, 16] считаем, что эмиссия денежных средств  $E$  пропорциональна стоимости выпуска,  $E(t) = \pi p(t)Y(t)$ . Подсчитывая задолженность фирм, надо учесть следующее обстоятельство [?, 13, 16]. При сильных колебаниях цен может оказаться невыполненным условие обеспечения кредита,  $l(t, \tau) \leq k(t, \tau)$ . Часть фирм может обанкротиться, иначе говоря, может оказаться, что у них  $m(t, \tau) = 0$ , а  $l(t, \tau) > 0$ . Как и в [?, 13, 16], мы будем считать, что задолженность таких фирм списывается и не учитывается в активах банка, поэтому

$$L = \int_{m(t, \tau) > 0} l(t, \tau) d\tau. \quad (4.40)$$

Как и в [?, 13, 16], предполагаем, что резерв банковской системы  $R$  изменяется в силу уравнения

$$dR/dt = E(t) \quad (4.41)$$

и обеспечивает депозиты при законодательно установленной норме  $\xi$ :

$$R \geq \xi D. \quad (4.42)$$

Финансовый баланс банковской системы выражается равенством

$$D(t) = R(t) + \overline{L}(t). \quad (4.43)$$

В "нормальной" [?, 13, 16] ситуации, когда  $r_1(t) > 0$ , банк стремится предоставить максимальный кредит, который допускают соотношения (4.42) и (4.43):

$$L = R(1 - \xi)/\xi. \quad (4.44)$$

Организаторы фирм берут весь предлагаемый кредит. Тогда

$$dL/dt = \Phi^I(t) + \Lambda(t), \quad \Lambda = \frac{\partial}{\partial t} \int_{m(t, \tau) > 0} l(t, \tau) d\tau. \quad (4.45)$$

Здесь  $\Lambda$  — прирост задолженности фирм, за вычетом задолженности банкротов. Таким образом, в "нормальной" ситуации

$$\Phi^I = -\Lambda + E(1 - \xi)/\xi. \quad (4.46)$$

Ситуацию, при которой  $\Phi^I(t) < 0$  можно интерпретировать как крах банковской системы, а состояние модели, в котором он наступает, следует считать недопустимым.

Теперь опишем рынки товаров, рабочей силы и капитала.

Как и в [?, 13, 16], будем полагать, что рынок товаров находится в равновесии:

$$p(t)Y(t) = s(t)R^L(t) + \Phi^I(t) + \Phi^N(t) + \Phi^W(t). \quad (4.47)$$

Цена на рынке древесины,  $g(t)$ , колеблется в соответствии с остатком запаса биомассы древесины

$$dg/dt = (1 - W/W^*)g(t)/\Delta_g. \quad (4.48)$$

Здесь  $\Delta_g$  определяет характерное время изменения  $g(t)$ , а  $W^*$  характеризует некоторую "равновесную" величину биомассы леса,  $W^* = (1 - \alpha^*)W_0$ ,  $\alpha^*$  — постоянная величина.

На рынке рабочей силы возможны две ситуации. Во-первых, спрос на рабочую силу,  $R^L(t)$ , меньше, чем ее предложение,  $\tilde{R}^L(t)$ . В этом случае ставка заработной платы  $s(t)$  постоянна. Во-вторых,  $R^L(t) > \tilde{R}^L(t)$ , тогда  $s(t)$  быстро растет, уравнивая спрос и предложение. Обе ситуации описываются уравнением

$$ds/dt = \left( R^L(t)/\tilde{R}^L(t) - 1 \right)_+ s(t)/\Delta_s, \quad (4.49)$$

в котором  $\Delta_s$  определяет характерное время изменения  $s(t)$ .

Для определения предложения рабочей силы необходимо описать класс трудящихся, занятых в производстве. Обозначим через  $N^L$  численность класса трудящихся и через  $A^L$  — численность активных членов этого класса. Мы считаем, что трудящиеся весь свой доход  $sR^L$  сразу же тратят на потребление. Материальный уровень жизни трудящихся будем задавать средним уровнем потребления на душу населения,

$$\omega^R(t) = s(t)R^L(t)/(p(t)N^L(t)), \quad (4.50)$$

и будем считать, что предложение трудовых ресурсов на рынке труда выражается через материальный уровень жизни:

$$\tilde{R}^L(t) = A^L(t)\chi(\omega^R(t)), \quad 0 \leq \chi(\omega^R(t)) \leq 1. \quad (4.51)$$

Изменение численности класса трудящихся опишем уравнением

$$dN^L/dt = n(P(t))N^L(t), \quad (4.52)$$

где  $n = n(P)$  — темп роста населения, который падает при увеличении загрязнения  $P$  (увеличение смертности, тяжелых болезней). Численность активных членов класса трудящихся зададим уравнением

$$A^L(t) = \kappa(P(t))N^L(t), \quad (4.53)$$

где  $\kappa = \kappa(P)$  — доля активных членов в классе трудящихся, которая падает при увеличении загрязнения  $P$ , например, из-за болезней.

На рынке капитала спрос предъявляют фирмы, для которых  $f(t, \nu(t), c(t), a(t)) > r_1(t)$  (см. (3.26)). Банковская система заинтересована выдать кредит под наибольший процент. Поэтому можно считать, что процент, устанавливаемый на рынке кредитов,

$$r_1(t) = \max_{\nu \geq \nu_0, c \geq c_0, a \geq a_0} f(t, \nu, c, a), \quad (4.54)$$

где  $\nu, c, a$  — характеристики наилучших технологий. Новые фирмы создаются на технологиях

$$(\nu(t), c(t), a(t)) = \arg \max_{\nu \geq \nu_0, c \geq c_0, a \geq a_0} f(t, \nu, c, a). \quad (4.55)$$

Чтобы иметь средства для предоставления кредита  $\Phi^I$ , банковская система должна увеличить депозиты в соответствии с равенством (4.43). Она может это сделать, увеличив процент  $r_2$ . Из сказанного следует, что соотношения (4.39), (4.41), (4.43), (4.45) эквивалентны равенству, из которого определяется норма процента  $r_2$ :

$$r_2 D + \int_{-\infty}^t d(t, \tau) d\tau = \Phi^I + \Lambda. \quad (4.56)$$

Неравенство  $r_1 < 0$  означает, что новые фирмы будут организовываться только при условии, что банковская система будет на это давать субсидии. Мы предполагаем, как и в [?, 13, 16], что в этой ситуации банковская система прекращает выдачу кредитов ( $\Phi^I = 0$ ), и полагаем  $r_1 = 0$ . Величина нормы процента по вкладам  $r_2$  по-прежнему определяется из условия (4.56).

Будем полагать, что ставка налога на загрязнение,  $N(t)$ , изменяется в силу уравнения

$$dN/dt = \left( P(t)/P_0(t) - 1 \right) N(t)/\Delta_N, \quad (4.57)$$

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 (4.57) описывает процесс реакции общества на экологическую опасность.

Согласно (4.53), (4.52)

$$dA^L/dt = \left( n(P) + \left( \frac{d\kappa}{\kappa dP} \right) \left( \frac{dP}{P dt} \right) P \right). \quad (4.58)$$

Отсюда найдем предельную величину загрязнения  $P_*(t)$ , при которой темп роста численности активных членов класса трудящихся не отрицателен:

$$n(P_*) + P_*(t) \left( \frac{d\kappa}{\kappa dP} \right) \left( \frac{dP}{P dt} \right) = 0. \quad (4.59)$$

Величина  $P_*$  — это предельный уровень загрязнения, который согласны терпеть "трудящиеся".

Процесс согласования интересов "трудящихся" и "предпринимателей" опишем уравнением

$$dP_0/dt = \left( P_*(t) - P_0(t) \right) / \Delta_P, \quad (4.60)$$

определяющим предельный уровень загрязнения, на который реагирует "государство". Здесь  $\Delta_P$  — величина, определяющая характерное время изменения  $P_0(t)$ . Значение величины  $\Delta_P$  показывает насколько сильно "предприниматели" сдерживают изменение предельного уровня загрязнения.

Заметим, что учет резервных мощностей, смягчающих процессы загрузки, создания и демонтажа мощностей, позволил в отличие от [13] рассмотреть механизм саморегулирования предельного уровня загрязнения  $P_0$ . Кроме того, численные эксперименты удалось провести, используя описания для изменения стоимости природного ресурса (4.48), ставки заработной платы (4.49) и налога на загрязнение (4.57): в [13] задавались постоянные характерные скорости изменения этих величин, а в настоящей работе — характерные времена изменения их темпов.

## 5 Долгосрочные последствия различных способов регулирования

В проведенных численных экспериментах считалось, что норма  $a$  потребления древесины одна и та же для всех фирм, и выбирались следующие формы зависимостей  $B(t, \tau)$  и  $b(\nu, c)$  [13]:

$$B(t, \tau) = b(\tau) \exp(-\delta_B(t - \tau)), \quad b(\nu, c) = b_1 / ((\nu + b_2)(c + b_3)), \quad (5.61)$$

где  $\delta_B$  — постоянный темп снижения с возрастом количества продукции, которое можно получить при демонтаже единицы мощности,  $b_1, b_2, b_3$  — постоянные.

Дальнейшие рассмотрения ведутся в момент времени  $t$ , и мы для простоты записи пишем  $p, s, N, g$  вместо  $p(t), s(t), N(t), g(t)$ . В соответствии с (3.21) для  $\rho = \rho(t, t)$  имеем  $\rho = (p(1 - Nc) - ag)/(s\nu)$ , так что

$$c = \left(1 - ag/p - \rho s\nu/p\right)/N. \quad (5.62)$$

Исключая параметр  $c$  из (5.61) с помощью (5.62), получим

$$b = B_1/((b_2 + \nu)(B_3 - \nu\rho)), \quad B_1 = b_1 N p/s, \quad B_3 = (p N b_3 + p - ag)/s. \quad (5.63)$$

В соответствии с (3.26), (4.54), (5.63)

$$r_1 = (s\nu J(\rho))/(pb(\nu, \rho)), \quad J(\rho) = \int_1^\rho \zeta(\xi) d\xi. \quad (5.64)$$

В частном случае, когда  $\zeta(\rho) = 1 - \exp(-\alpha_\rho(\rho - 1))$ , найдется единственный максимум у (5.64), и проблемы распределения инвестиций между фирмами с равным процентом  $r_1$  не возникает.

Считалось, что темп прироста населения менялся в соответствии с уравнением

$$n(P) = n_0(1 - \alpha_n P), \quad (5.65)$$

а доля активных членов в классе трудящихся

$$\kappa(P) = \kappa_0 \exp(-\alpha_\kappa P). \quad (5.66)$$

Предельный уровень загрязнения  $P_*$ , который согласны терпеть "трудящиеся", в соответствии с (4.59) будем определять из условия неотрицательности темпа роста численности активных членов класса трудящихся:

$$P_*(t) = \min\left(P_0, n_0/(n_0\alpha_n + \alpha_{kappa} \gamma_P)\right), \quad (5.67)$$

где  $\gamma_P$  — темп роста загрязнения,  $\gamma_P = (1/P)dP/dt$ . Пробные численные эксперименты показали, что если в выражении (5.67) убрать ограничение на рост  $P_*$ , то для плохо сбалансированной экономики 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.

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 в общем случае расположено несколько шкал, так как на каждом рисунке могут быть представлены графики нескольких переменных. Переменные "экосистемы" на всех рисунках приведены в процентах от стационарных значений этих величин (начальными значениями этих величин во всех дальнейших расчетах задавались равными стационарным). Цифры справа от оси ординат означают соответствующие единицы для каждой переменной.



Результаты первых вычислительных экспериментов помогают понять структуру модели. Система уравнений модели допускает частное решение, называемое режимом сбалансированного экспоненциального роста. В этом режиме экстенсивные переменные: мощность, выпуск, занятость и т.д. — растут с постоянным темпом, а интенсивные переменные: цена на выпускаемую продукцию, ставка заработной платы, нормы процентов, технологии, на которых создаются новые фирмы, — постоянны во времени. Структура мощностей на режиме экспоненциального роста стационарна. Параметры сбалансированного роста, в том числе темп роста, определяются структурой и параметрами связей, описанными в модели. Если начальная структура мощностей и другие параметры не соответствуют режиму сбалансированного роста, то модель выходит в этот режим после начального переходного процесса.

Другое частное решение — режим колебаний вблизи сбалансированного роста. Эти колебания связаны с неравномерностями в распределении производственных мощностей и хорошо отражают фазы делового цикла: "застой", "рост", "бурный рост", "кризис". Фаза "кризис" выражается в относительном избытке мощности. Эти колебания не столь опасны, как наличие длинного "хвоста" у распределения производственных мощностей. Длину "хвоста" у распределения можно характеризовать отношением средней производительности труда к наименьшей из используемых  $\nu Y^L/R^L$ : чем меньше это отношение тем длиннее "хвост".

Во всех экспериментах были использованы параметры экологической части модели, которые приведены в конце секции 2, а также следующие числовые данные параметров экономической части модели:  $P_0(0) = 100$ ,  $\Delta_P = 20$ ,  $g(0) = 0.5$ ,  $\Delta_g = 4$ ,  $a = 0.015$ ,  $\alpha^0.05$ ,  $\alpha_n = 0.005$ ,  $\kappa_0 = 0.7$ ,  $\alpha_\kappa = 0.01$ ,  $\Delta_N = 20$ ,  $A^W = 100$ ,  $b^W = 4$ ,  $\delta_B = 0.05$ ,  $b_1 = 2.5$ ,  $b_2 = -0.01$ ,  $b_3 = 12$ ,  $\mu = 0.023$ ,  $\beta = 0.08$ ,  $\xi = 0.11$ ,  $\pi = 0.015$ ,  $N(0) = 0.025$ ,  $c_0 = 0.5$ ,  $\nu_0 = 0.06$ ,  $\alpha_\rho = 0.35$ ,  $p(0) = 1.57$ ,  $s(0) = 4.5$ ,  $n_0 = 0.035$ ,  $\Delta_s = 1$ ,  $N^L(0) = 100$ ,

, — — — исключение этих параметров, которые явно указаны в описании.

На Рис.2 представлены результаты численного эксперимента с моделью, в котором начальное распределение производственных мощностей было подобрано так, чтобы параметры модели, приведенные выше, приводили к достаточно хорошо сбалансированному началу. Назовем этот вариант базовым, и будем с ним сравнивать результаты других экспериментов. В этом варианте на первой половине расчетного периода (до 50 лет) интенсивные переменные экономической системы испытывают небольшие колебания вблизи сбалансированного роста с малой амплитудой и с периодом около 20 лет (см. Рис.2и) темп роста экономики  $\gamma$ , проценты  $r_1, r_2$ ), а экстенсивные переменные экспоненциально растут (загрязнение, выпуск, мощности) или снижаются (показатель  $P_0$ , экологические переменные  $W, V, U$ ). Начиная с 50 года становится заметен рост цены на сырье  $g$ , вызванный истощением природного ресурса  $W$ , с 60 года начинает увеличиваться налог на загрязнение, вызванный снижением предельного уровня загрязнения  $P_0$  до уровня фактического загрязнения  $P$ , а с 65 года к тому же начинается рост заработной платы  $s$ , вызванный нехваткой предложения трудовых ресурсов, и рост цены на выпускаемую продукцию. Тем не менее, экономика справляется со всеми тремя кризисами действующими одновременно (экологический, природного ресурса, трудовых ресурсов). Подъем цены на сырье увеличивает природоохранные мероприятия (посадка деревьев), увеличение налога на загрязнение  $N$  приводит к созданию новых фирм с технологиями с постепенно уменьшающимися выбросами вредных отходов (снижение  $c$ ), это приводит к увеличению фондоемкости  $b$ , снижение фондоемкости вместе с ростом затрат на оборот приводит к снижению темпа роста экономики  $\gamma$ , и начиная с 80 года уровень загрязнения и вместе с предельным уров-

нем загрязнения начинают экспоненциально снижаться. Значит, предложенный механизм саморегулирования вполне работоспособен и дает экономической системе с достаточно сбалансированным началом выйти из такого сложного кризиса.

Рис.3: Перед его описанием

а) налог не на добавленную стоимость а на выбросы - разваливается, не успевает среагировать (СЛОВАМИ)

б) проверка уравнения на налог, если позволить ему снижаться, то система не всегда справляется даже при небольшом отклонении от сбалансированного роста (СЛОВАМИ)

с) проверка уравнения на механизм формирования предельного уровня загрязнения -позволить снижаться, то из сбалансированного начала выдерживает на грани, а при небольшом смещении экономическая система не справляется с возникающими колебаниями, развал (РИС.3)

д) Ограничения (налог только вверх, предельный уровень только вниз) приводят к тому, что экология живет, но экономические параметры требуют изменения (смягчения), либо уравнения должны допускать снижения, т.е. сначала нужно выйти на сбалансированный рост, а потом уже заниматься экологическими вопросами (если время терпит).

Рис.4: Демонстрация выхода из сбалансированного режима (увеличение резервных мощностей — снижение загрузки мощностей) чуть ниже загрузка и экономика разваливается на первом шаге

Рис.5: Попытка перейти к производственной функции [13] при  $\alpha_p$  стремящемся к бесконечности

а) база

б) предельный уровень увеличения загрузки мощности пока еще живет

в) уровень когда еще не разваливается на 1 шаге, а только на кризисе

с) на рис.5 все три кривые по отдельным показателям

д) попытка перейти к сбалансированному началу в случае в) не привела к выходу из кризиса, надо менять еще другие параметры. Так что сравнение двух производственных функций не тривиальная задача. При изменении каких параметров можно еще говорить о сравнении?

ДАЛЕЕ В ЭТОМ ПУНКТЕ СТАРЬЕ

Вначале были проведены пробные численные эксперименты, обосновывающие выбор уравнений. В качестве примера на рис.5 приведены результаты эксперимента, в котором считалось, что налог на загрязнение устанавливается в денежных единицах на выбросы загрязнения  $c(\tau)y(t, \tau)$ . Считалось, что имеются абсолютно "чистые" технологии:  $c_0 = 0$ , — и, кроме того, налог не может уменьшаться. Тем не менее, решение теряло смысл при  $t = 85$ . Рост цены  $p$ , вызванный ростом  $g$  и  $s$ , связанным с уменьшением природных и трудовых ресурсов, при неизменном налоге вызвал появление новых фирм с "грязными" технологиями (см. на всплеск  $c(0)$  при  $t = 65$ ) и рост комплексного показателя загрязнения  $P$ . Вслед за ростом комплексного показателя загрязнения  $P$  последовало снижение предельного уровня загрязнения  $P_0$  и резкий рост налога на загрязнение  $N$ . Рост загрязнения сопровождался уменьшением экологических переменных, что вызвало ускорение роста стоимости природного ресурса  $g$ . Можно считать, что экономическая система не смогла справиться с такой ситуацией и развалилась. Демонтаж фирм с "грязными" технологиями, хотя и достиг всего лишь уровня 5% от суммарной мощности, но приостановил рост  $p$ , в то время как налог  $N$ , цена  $g$  и ставка заработной платы  $s$  продолжали расти. Это вызвало резкое сокращение выпуска и банкротство фирм. Поэтому в дальнейших экспериментах считалось, что ставка налога на загрязнение  $N$  устанавливается на добавленную стоимость пропорционально уровню загрязнения, как и привеле в описании

модели.

На рис.6 приведены результаты численного эксперимента, в котором считалось, что налог на загрязнение  $N$  может не только расти в соответствии с уравнением (4.57), но и падать с темпом, определяемым тем же характерным временем  $\Delta_N$ . Предполагалось наличие абсолютно "чистых" технологий и избыток предложения трудовых ресурсов:  $s = const$ . В данном эксперименте развала не наступило, однако видно, что возможность падения налога  $N$  плохо отражается на поведении переменных модели. Из рисунка видно, что падение  $N$  вызывает переход новых фирм на "грязные" технологии и резкий рост показателя  $P$ , причем с каждой новой волной выбросов уровень  $P$  поднимается, вызывая резкие перепады в темпе роста населения. В других экспериментах с таким же изменением налога наступал развал экономической системы или экологический кризис, выражающийся в исчерпании природного ресурса. В описываемых ниже экспериментах считалось, что налог падать не может.

На рис.7 приведены результаты эксперимента, в котором отчетливо виден режим колебаний вблизи сбалансированного роста. В этом эксперименте считалось, что нет потребления природного ресурса:  $a = 0$ , - предполагалось наличие абсолютно "чистых" технологий:  $c = 0$ , - и был избыток предложения трудовых ресурсов:  $s = const$ . На рис.7 отчетливо видны колебания  $\nu, b, \gamma, r_1, r_2, Y^L/M$ . Эти колебания сопровождаются колебаниями  $Y^U/M$ , и хотя уровень демонтажа мощностей невелик, что связано с большим темпом морального старения  $\delta_B$ , это вызывает колебания цены  $p$ . Несмотря на эти колебания, период которых определяется средним возрастом демонтажа  $\tau^u = 15$ , экономическая система справляется с ростом загрязнения  $P$ , вызывая переход на "чистые" технологии.

В следующих экспериментах считалось, что нет абсолютно чистой технологии. На рис.8 представлены результаты сравнения двух экспериментов, в которых  $c_0 = 0, 2$ ,  $a = 0$ ,  $\Delta_P = 20$ . Кривые 1 отвечают предложенному механизму подъема налога, а кривые 2 — случаю, когда налог поднимается заранее. Видно, что во-втором случае угнетающего воздействия на экологические показатели практически не происходит. В этом случае экономика заранее перестраивается в режим роста на экологически чистой технологии. В первом варианте, когда общество не столь остро реагирует на экологическую опасность, выход в режим роста на экологически чистой технологии затягивается. Это приводит к существенному снижению экологических показателей и только потом они начинают медленно восстанавливаться. Надо обратить внимание на то, что второй вариант регулирования ставки налога дает возможность своевременно создать экологический фонд  $\Phi^N$ , за счет которого проводится очистка загрязнений. Кроме того, в пробных экспериментах было замечено, что нельзя с самого начала установить самый высокий уровень налога. Экономика не выдерживает такой жесткой экологической политики: происходит развал системы. Это связано с тем, что начальное распределение производственных мощностей содержит неравномерности, то есть отличается от сбалансированного распределения (распределения, которое устанавливается в режиме сбалансированного роста). Итак, подтверждается вывод, сделанный в [13], о желательности упреждающей экологической политики и о том, что жесткость этой политики сильно зависит от сбалансированности начальных данных.

Пример, когда слишком быстрое изменение предельного уровня загрязнения  $P$  приводит к развалу системы, показан на рис.9. При этом так же как в экспериментах, представленных на рис.8, считалось  $c_0 = 0, 2$ ,  $a = 0$ , в то время как  $\Delta_P = 5$ . Резкий рост налога  $N$  вызывает резкий демонтаж мощностей фирм с "грязными" технологиями, а таких технологий абсолютное большинство (на рис.9 виден огромный скачок  $Y^U/M$ ). Резкий демонтаж мощностей приводит к падению цены  $p$ , что способствует банкротству

фирм и еще больше увеличивает демонтаж. Развал системы происходит при  $t = 17$ . На этом же рисунке отчетливо виден переход новых фирм на более трудоемкие технологии ( $\nu$  растет) при росте налога  $N$  и цены  $p$ . Если замедлить изменение  $P_0$  :  $\Delta P = 10$ , — то система справляется с переходом с "грязных" технологий на "чистые". На рис.10 показаны некоторые результаты этого эксперимента. Отчетливо виден, превышающий обычные периодические, скачок демонтажа мощностей  $Y^U/M$  при  $t = 30$ . Этот скачок связан с переходом на наиболее "чистые" технологии и видоизменяет ритм колебаний.

В последующих экспериментах допускалось производственное потребление природного ресурса:  $a = 0,03$ . На рис.11 — 12 показано, как сказывается значение величины фондоемкости восстановления природного ресурса  $b^W$  на поведении системы. При очень большой фондоемкости восстановительных работ уровень  $W$  падает, что приводит к резкому росту  $g$ , за ростом  $g$  следует рост  $p$  (см. рис.11,  $b^W = 20$ ). Однако одновременно с этим происходит переход с "грязных" технологий на "чистые", растет уровень налога  $N$ . Система пытается приспособиться к росту  $g$ , используя более трудоемкие, однако менее фондоемкие технологии, поскольку доля накопления  $\Phi^I/(pY)$  падает. Рост налога вызывает демонтаж мощностей фирм с "грязными" технологиями, это замедляет рост цены  $p$ . Банковская система не способна выдать положительный объем ссуд  $\Phi^I$  (происходит крах банковской системы), одновременно с этим все фирмы становятся нерентабельными (происходит развал системы). Кроме того, уровень экологических величин неуклонно снижается (происходит экологический кризис). На рис.12 приведены результаты эксперимента, в котором  $b^W = 8$ . В этом случае система не допускает истощения природного ресурса и обеспечивает переход на "чистые" технологии. Достаточный уровень  $\Phi^W$  обеспечивает восстановление природного ресурса.

В последней серии численных экспериментов исследовался случай ограниченного предложения трудовых ресурсов. Оказывается, что в таком случае система разваливается, если норма выброса загрязняющих веществ для самых "чистых" технологий высока.

На рис.13 представлены результаты эксперимента, когда происходит развал экономической системы с одновременным крахом банковской системы при  $t = 30$ . При этом  $c_0 = 0,2$ ,  $a = 0,03$ . При  $t = 21$  система переходит в режим роста при дефиците трудовых ресурсов:  $s$  растет. Это вызывает рост цены  $p$ , повышение налога  $N$ , переход новых фирм на более "чистые" технологии. При этом комплексный показатель загрязнения  $P$  практически не меняется, предельно допустимый уровень загрязнения  $P$  растет, налог  $N$  не растет. Однако рост ставки заработной платы  $s$  и стоимости природного ресурса  $g$  уменьшает уровень рентабельности фирм, уменьшается скорость выплат задолженности, появляются банкроты, демонтаж мощностей банкротов сбивает рост цены  $p$ , что еще больше ускоряет демонтаж. В результате цена  $p$  падает до 0, производство останавливается, а банковская система терпит крах.

На рис.14 представлены результаты эксперимента, в котором допускалось наличие абсолютно "чистых" технологий:  $c_0 = 0$ . Здесь экономическая система справляется с переходом на "чистые" технологии, справляется с возникающими время от времени инфляционными режимами, вызванными недостатком трудовых ресурсов, однако происходит полное истощение природного ресурса  $W$  (экологический кризис).

На рис.15 представлены результаты эксперимента, когда имеются довольно "чистые" технологии:  $c_0 = 0,03$ . В этом случае система справляется с ростом  $s$ ,  $g$  и с переходом на трудосберегающие и "чистые" технологии. Здесь видно, что во время безработицы, когда  $s = const$ , рост стоимости природного ресурса  $g$  вызывает переход на более трудоемкие технологии. Во время инфляции, когда  $s$  растет, происходит переход на трудосберегающие технологии. Во время инфляции происходит изменение формы распределения про-

изводственных мощностей по возрасту. Это выражается в учащении колебаний, которые сопровождаются колебаниями остаточного продукта, полученного при демонтаже фирм.

Если же "чистых" технологий нет:  $c_0 = 0, 2$ , то задолго до исчерпания природных ресурсов экономическая система разваливается. На рис.16 представлены результаты одного из экспериментов, когда рост  $g, s, N$  вызывает развал системы. Здесь развал происходит при  $t = 55$ . Экономическая система не справляется с одновременным ростом налога  $N$ , стоимости природного ресурса  $g$ , ставки заработной платы  $s$ .

#### Выводы и рекомендации

1. Удалось построить саморегулирующийся механизм разрешения эколого-экономических конфликтов, который позволяет выйти из кризиса в широкой области 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 угодить 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 недостатком предложения трудовых ресурсов (рост заработной платы активной части населения, занятой в производстве). Здесь существенным оказывается наличие у фирм резервных мощностей, что позволяет гасить колебания макропоказателей и цен, вызываемые ликвидацией фирм с грязными технологиями.

3. Сценарные расчеты с моделью подтверждают вывод [13], о том, что возможность пройти между Сциллой экономического развала и Харибдой 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.

4. Построенный в настоящей работе упрощенный динамический вариант модели лесной экосистемы количественно практически не отличается от модели, идентифицированной в [14], дает качественно верные результаты и может быть положен в основу дальнейших исследований взаимодействия экологических и экономических процессов.

5. Производственная функция [15, 13] хуже производственной функции с учетом резервных мощностей [16], так как для избежания неправдоподобных скачков в динамике макропоказателей требует феноменологического описания постепенного списания устаревшего оборудования. Настоящая работа подтверждает работоспособность производственной функции, полученной в [16], и тем самым дает основание рекомендовать ее для дальнейших исследований.

Если не существует достаточно "чистых" технологий, если фондоемкость восстановления природного ресурса велика, если уровень очистки загрязнения не велик, если отношение средней трудоемкости производства к наименьшей велика, то легко насочить либо на развал экономической системы, либо на полную деградацию экосистемы. Кроме того, даже для хорошо сбалансированной и сильной экономики справедлив лозунг современных экологов: "Надо предвидеть и предвосхищать, а не замечать и исправлять".

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вернадский В.И. Начало и вечность жизни. М.: Сов. Россия, 1989. - 704 с.
- [2] Моисеев Н.Н. Современный рационализм. М.: МГВШ КОКС, 1995. - 376 с.
- [3] Оленев Н.Н., Петров А.А., Поспелов И.Г. Некоторые результаты исследования модели экономики переходного периода. М.: ВЦ РАН, 1997. - 47 с.
- [4] Nordhaus W. Managing the Global Commons, the Economics of Climate Change. Cambridge MA: MIT Press, 1994.
- [5] Smulders S. Entropy, Environment, and Endogenous Economic Growth.// International Tax and Public Finance. - 1995. - V.2. - P.319-340.
- [6] Romer P. Increasing Returns and Long-run Growth.// Journal of Political Economy. - 1986. - V.94(5). - P.1002-1037.
- [7] Romer P. The Origins of Endogenous Growth.// Journal of Economic Perspectives. - 1994. - V.8. - P.3-22.
- [8] Lucas R. E. Jr. On the Mechanics of Economic Development.// Journal of Monetary Economics. - 1988. - V.22(7). - P.3-42.
- [9] Rebelo S. Long-run Policy Analysis and Long-run Growth.// Journal of Political Economy. - 1991. - V.99. - P.500-521.
- [10] Smulders S., Gradus R. Pollution Abatement and Long-term Growth.// European Journal of Political Economy. - 1996. - V.12. - P. 505-532.
- [11] Khanna M., Zilberman D. Incentives, Precision Technologies, and Environmental Protection.//Ecological Economics. (forthcoming)
- [12] Лотов А.В., Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А. Концепция математического обеспечения новых информационных технологий оценки экологических последствий экономических решений. Москва - Переславль-Залесский, 1990. - 61 с.
- [13] Оленев Н.Н. Модель государственного регулирования экологических последствий экономического роста. М.: ВЦ АН СССР, 1991. - 43 с.
- [14] Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А.А. Опыт математического моделирования экономики. М.: Энергоатомиздат, 1996. - 544 с.
- [15] Оленев Н.Н., Поспелов 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.
- [16] Оленев Н.Н. Модель жизненного цикла основных фондов и производственная функция, учитывающая резервы мощностей. // Математическое моделирование. - 1995. - Т.7, N 7. - С.19-33.
- [17] Тарко А.М., Ведюшкин М.А., Писаренко Н.Ф., Татарин Ф.А. Моделирование воздействия промышленных загрязнений на лесные экосистемы. М.: ВЦ АН СССР, 1987. 19 с.

*Поступила в редакцию*

*18.02.98*