

На правах рукописи

НЕДОРЕЗОВ

Тимур Львович

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАТЕЖЕЙ**

05.13.16 – применение вычислительной техники, математического
моделирование и математических методов в научных исследованиях
(в экологии)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Красноярск – 2000

Работа выполнена в Институте Биофизики СО РАН

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук,
профессор **Хлебопрос Р.Г.**
Ph.D., профессор **Красс Д.**

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук,
Профессор **Белолинецкий В.М.**
Кандидат физ.-мат. наук **Кофман Г.Б.**

Ведущая организация: **Красноярский** отдел **Института**
экономики и организации промышленного производства СО РАН,
г. Красноярск

Защита диссертации состоится 14 июня 2000 года в 14.00 в аудитории Г4-17 на заседании диссертационного совета К064.54.01 при Красноярском государственном техническом университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ.

Отзыв на реферат в 2-х экземплярах, с подписью составителя и заверенный гербовой печатью организации просим направлять в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан 13 мая 2000г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент

Кузьменко Н.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Рассмотрим положение в некоторой географической области, где развивается определенный вид производства. Пусть объем производства в некоторый момент времени равен V (безразлично, в каких единицах его измеряют), а величина выбрасываемых в окружающую среду отходов на единицу произведенной продукции равна ε . Тогда величина всех выбросов от данного вида производства составляет $\varepsilon \cdot V$. Существует предельная величина суммарного выброса, какую может безопасно принять рассматриваемая гипотетическая область, то есть переработать в безвредные вещества, или содержать в приемлемой для человека концентрации; назовем эту величину экологической емкостью области и обозначим ее через A . Очевидно, что для экологической допустимости производства должно соблюдаться неравенство $\varepsilon \cdot V < A$. Величина V увеличивается, и чтобы неравенство выполнялось, нужно уменьшать ε , совершенствуя методы очистки.

Работа посвящена задаче выбора оптимального штрафа за загрязнение окружающей среды, который бы вынуждал использовать на предприятиях очистительные установки с более высоким коэффициентом очистки отходов (и, следовательно, более дорогие установки). Это, разумеется, скажется самым благоприятным образом на экологической ситуации в нашей гипотетической области. Но важно уметь предвидеть негативные эффекты при выборе штрафов. Это и определяет актуальность выбранной темы.

Цель работы - выявить основные закономерности изменения состояний монополистического и олигополистического рынков в зависимости от величины штрафов за загрязнение окружающей среды.

Задачи исследований:

- рассмотреть различные ситуации на монополистическом и олигополистическом рынках для выявления характерных границ изменения значений штрафов, при которых предприятию становится выгодным приобретать лучшую установку для очистки выбросов, а также границ штрафов и условий на параметры системы, при которых возможна реализация негативных эффектов;
- исследовать возможность «двойных дивидендов» (одновременного сокращения загрязнения окружающей среды и увеличения бюджетных поступлений) при увеличении налога на загрязнение окружающей среды;
- построить игровую модель, в которой участникам - предприятиям позволено не только выбирать количество производимого продукта, но и тип очистительной установки; доказать, что у данной игровой модели существует равновесие по Нэшу и изучить зависимость стратегий игроков от величины штрафа;
- разработать и проанализировать динамические модели конкурентного взаимодействия предприятий при различных видах стратегий поведения предприятий на рынке;
- исследовать, зависимость величины прибыли, объема производства и цены единицы продукции от величины штрафа.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- дано математическое обоснование экономического эффекта, заключающегося в том, что природоохранный налог не всегда обеспечивает двойную выгоду - улучшение состояния окружающей среды и получения максимальных доходов бюджетом;
- определены условия реализации негативных эффектов, обусловленных неправильным выбором величины штрафа; при определенных значениях параметров как слишком малое, так и слишком большое значение штрафа приводит к разорению предприятия, использующего лучшую очистительную установку;
- построена игровая модель с двумя игроками - фирмами, множества стратегий которых представляют собой декартово произведение множества допустимых мощностей и совокупности доступных очистительных установок;
- разработано семейство динамических моделей конкуренции на олигополистическом рынке, учитывающих разные прогностические стратегии, разные системы штрафования, а также ограничения по мощности производства.

Практическая значимость работы заключается в том, что были получены точные оценки для величины штрафа, при которых достигается наибольший положительный эффект, когда предприятия вынуждены очищать свои вредные выбросы. Также в работе получены точные оценки для величины штрафа, при которых возникают нежелательные (негативные) эффекты.

По результатам исследований **опубликовано 4 работы.**

На защиту выносятся следующие положения:

1. Обнаружен и исследован эффект «двойного дивиденда».
2. Выявлены негативные эффекты, обусловленные непропорционально высокими или низкими штрафами; найдены достаточные условия параметров системы, при которых негативные эффекты могут реализоваться и при которых они не проявляются.
3. Разработана и проанализирована игровая модель дуополистического рынка со сложной структурой пространства стратегий игроков.
4. Построен комплекс динамических моделей конкурентного поведения на олигополистическом рынке.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка используемой литературы. Основной текст диссертации содержит 110 страниц машинописного текста, включая список литературы и 12 рисунков. Список используемой литературы включает 99 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, поставлена цель и определены задачи исследований. Сформулированы основные положения выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Дано краткое изложение содержания работы.

Глава 1 посвящена обзору различных подходов и математических моделей эколого-экономических систем.

Применению методов теории игр в эколого-экономических задачах посвящено много работ. Среди них хотелось бы отметить

следующие. Во-первых, это работы Н.Н. Воробьева по применению теоретико-игровых методов к вопросам охраны природы. В решении подобных задач применяются также дифференциальные игры: известны работы Г. Закура, В.В. Захарова, В.И. Зубова и Л.А. Петросяна. Приложениями иерархических игр в экологических задачах занимался В.В. Захаров. Известны работы Л.А. Петросяна о применении теории суперигр к вопросам охраны окружающей среды. Имеются существенные отличия моделей, рассмотренных в диссертационной работе от моделей, которые исследовались другими авторами. И эти отличия заключаются в следующем: во-первых, в работе рассматривалась система пропорционального штрафования, во-вторых, в моделях других авторов не изучается влияние изменения величин штрафов на характер взаимодействия предприятий, на их отношение к проблеме выбора и использования очистительных сооружений.

Во второй главе содержится анализ нескольких качественных моделей эколого-экономических систем, в том числе модель «двойной дивиденд».

Через $D(p)$ обозначим зависимость спроса D ; от цены p . Эта функция строго убывает. Предположим, что издержки предприятия f линейно зависят от количества выпускаемого продукта x (в действительности эта функция может быть нелинейной; часто в работах по экономике предполагают, что отдача от масштаба, то есть первая производная функции затрат, не убывает или не возрастает; мы же считаем, что она постоянна - это означает, что себестоимость продукции не зависит от количества произведенной продукции; эту модель следует рассматривать как первое приближение к реальности).

Можно утверждать, что если k - штраф, которым облагается предприятие, то его затраты описываются выражением:

$$f(x) = K + (C + k)x \quad (*)$$

Штраф, таким образом, пропорционален объему загрязнения, который (как мы допускаем для простоты) пропорционален выпуску. Если используется очистительная установка, характеризующаяся тремя параметрами: ценой Θ , стоимостью очистки ξ и параметром s , обозначающим степень переработки выбросов, то функция издержек имеет вид:

$$f(x) = K + \Theta + (C + \xi + \frac{k}{s})x \quad (**)$$

Полагая $x = D(p)$, находим прибыль фирмы $\overline{Pr}$, зависящую от штрафа k и цены p :

$$\overline{Pr}(k, p) = D(p)p - f(D(p))$$

Пусть предприятие является монополистом и может назначить на свой продукт цену, при которой имеет максимальную прибыль. Тогда

$$Pr(k) = \max_p \overline{Pr}(k, p)$$

Положим $p(k)$ - значение p , при котором $\overline{Pr}(k, p)$ достигает максимума:

$$p(k) = \arg \max_p \overline{Pr}(k, p)$$

Производство определяется так: $x(k) = D(p(k))$

Обозначим через $Pr_1(k)$ прибыль предприятия в том случае, когда не производится очистка отходов, то есть когда функция затрат имеет вид $(*)$ и $Pr_2(k)$, если используется очистительная установка, то есть затраты описываются выражением $(**)$. Аналогично, $x_1(k)$ и $x_2(k)$ -

производство в зависимости от того, есть установка или нет. При данном значении штрафа k реальная прибыль предприятия $Pr(k)$ будет равна $Pr_2(k)$, если $Pr_2(k) > Pr_1(k)$, (очистительная установка используется), и $Pr(k) = Pr_1(k)$, в противном случае:

$$Pr(k) = \max \{Pr_1(k), Pr_2(k)\}$$

Рассмотрим четвертую модель из второй главы. Эта модель предназначена для анализа ситуации, связанной с возможностью получения «двойных дивидендов» (одновременного сокращения загрязнения окружающей среды и увеличения бюджетных поступлений) при увеличении налога на загрязнение окружающей среды. В статье «Природоохранные налоги: существует ли двойной дивиденд?» автор, Р. Моргенштерн, анализируя фактические данные, обнаруживает весьма важный эффект: природоохранительный налог не всегда обеспечивает двойную выгоду. Рассматриваемая в диссертации модель в какой-то мере объясняет этот эффект.

Региональная власть, заботящаяся об экологической обстановке в области, естественно, должна стремиться к тому, чтобы назначить такой штраф k , при котором $Pr_2(k) > Pr_1(k)$, то есть предприятию выгодно использовать очистительную установку. Мы будем исходить из того, что власть заинтересована в том, чтобы собрать как можно больше налогов, чтобы в дальнейшем иметь возможность больший объем средств тратить на рекреационные работы. Поэтому, оптимальным решением является такой выбор штрафа k , при котором, с одной стороны, выполняется соотношение $Pr_2(k) > Pr_1(k)$, а, с другой, поступления в бюджет $Q(k)$ достигают максимального значения.

Функция $Q(k)$ имеет вид:

$$Q(k) = \begin{cases} kx_1(k) & \text{если } Pr_1(k) \geq Pr_2(k) \\ \frac{kx_2(k)}{S} & \text{если } Pr_1(k) < Pr_2(k) \end{cases}$$

В общем случае исследовать $Q(k)$ невозможно, поэтому предположим (для простоты), что спрос имеет постоянную эластичность $\delta > 1$.

График функции $Q(k)$.

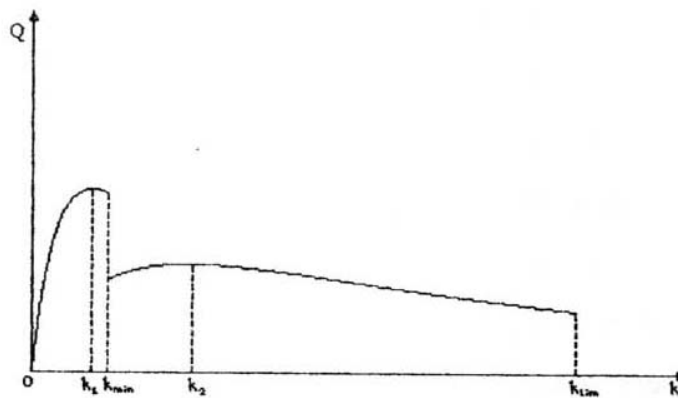


Рис. 2.5.

Поведение функции $Q(k)$ определяется взаимным расположением на оси Ok четырех чисел: двух локальных максимумов k_1 , k_2 и двух критических значений k_{min} и k_{lim} последнее из них - значение штрафа, при котором предприятие разоряется. Если выполнено неравенство $k_1 < k_{min} < k_2 < k_{lim}$, то есть эти четыре точки расположены также как на рисунке, то значение Q в точке k_1 , больше, чем в точке k_2 (что доказано аналитически).

Таким образом, не всегда природоохранительный налог обеспечивает двойную. Эффект, обнаруженный автором статьи, получил свое объяснение. Можно утверждать, что штраф k_2 - оптимален для государства, так как он вынуждает предприятие использовать очистительную установку и приносит при этом максимально возможную (в данной ситуации) прибыль в бюджет.

В главе 3 исследуются различные негативные эффекты, связанные с выбором штрафа.

Как уже было замечено, важно уметь предвидеть различные негативные эффекты, которые могут возникнуть при выборе величины штрафа за загрязнение окружающей среды. Как слишком большие, так и слишком малые штрафы могут привести к тому, что хорошее предприятие, имеющее более качественную и дорогую установку окажется в проигрыше (то есть получит меньшую прибыль или даже разорится). В диссертационной работе подробно рассматриваются два случая: случай монополии и дуополии. Монополист назначает такую цену на товар, при которой имеет максимальную прибыль. Точно также он решает, использовать дорогую установку с более высоким коэффициентом очистки или более дешевую и плохую, в зависимости от того, какую прибыль будет иметь.

Очень часто можно наблюдать такую ситуацию: при нулевом штрафе предприятию выгоднее заплатить штраф и не «включать» хорошую установку. Увеличение штрафа вынуждает предприятие использовать хорошую установку. В этом случае множество значений штрафа, не приводящих к разорению предприятия разбивается на два интервала: $(0, k_{min})$, (k_{min}, k_{lim}) (см. график $Q(k)$). На втором интервале

выполнено неравенство $Pr_2(k) > Pr_1(k)$. Но может так получиться, что множество допустимых значений распадается не на два, а на три интервала: на третьем интервале хорошая установка снова невыгодна. Это происходит из-за того, что дорогая установка не окупается. Данную ситуацию хорошо иллюстрирует следующий график:

Качественное поведение функций прибыли предприятия при различных очистительных установках.

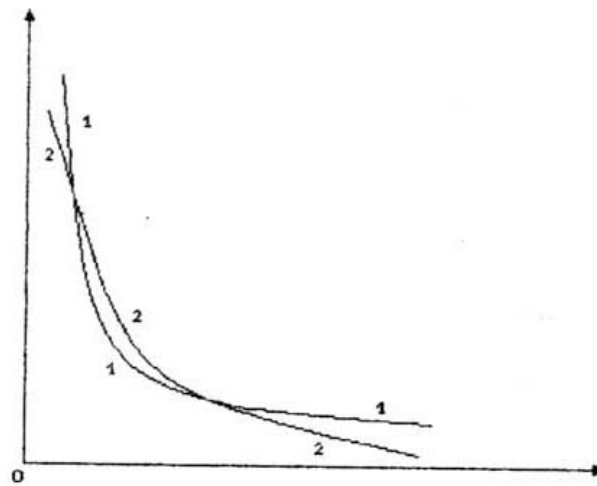


Рис. 3.1.

Здесь цифрами 1 и 2 обозначены функции прибыли предприятия соответствующие плохой и хорошей очистительной установке.

В случае дуополии мы предполагаем, что первое предприятие - плохое - использует плохую установку, второе - соответственно хорошую. Их прибыли определяются как результат игры по Курно (то есть они выражаются через количества произведенного предприятиями продукта, которые в свою очередь образуют равновесие по Нэшу игровой модели). Ситуация сходная с тем, что наблюдалось в случае монополии. При некоторых параметрах чрезмерное увеличение штрафа приводит к тому, что плохое предприятие получает большую прибыль.

Верны следующие утверждения:

1. При $\Theta_1 = \Theta_2$ (то есть когда цены плохой и хорошей установок равны, - отличаются стоимости очистки) указанный негативный эффект не реализуется.
2. Чем дороже хорошая установка, и чем меньше разница в качестве проводимой переработки отходов первой и второй установками, тем вероятнее появление «третьего интервала».

О втором негативном эффекте. Когда штраф слишком мал, плохое предприятие имеет, как правило, большую прибыль, чем хорошее. Но, на самом деле, хорошее предприятие может просто разориться. Объяснение этого эффекта таково: когда штраф k мал, предприятие с дешевой очистительной установкой (дешевой по цене или стоимости очистки), захватывает рынок, разоряя конкурента; когда же штраф достаточно велик, становится выгодно использовать хорошую установку и ситуация на рынке меняется в лучшую сторону для прогрессивного предприятия. Вывод: оптимальный штраф не может быть ни слишком большим, ни слишком маленьким.

В четвертой главе рассматривается игровая модель с непрерывно-дискретным множеством стратегий игроков. В этой главе рассматриваются две игровые модели. В обеих моделях стратегии игроков включают в себя тип очистительной установки (из множества доступных данному предприятию установок) и мощность (количество произведенного продукта). В первой модели игроки равноправны и поэтому рассматривается равновесие по Нэшу. Во второй модели первое предприятие имеет преимущество - право делать выбор первым, - в этом случае используется модель Штакельберга.

В модели Нэша доказывалось существование равновесия. Данная игровая модель имеет не более трех точек равновесия. При этом вычисления на компьютере показывают, что, как правило, существует ровно одно равновесие по Нэшу, значительно реже - два, случай же с тремя равновесиями не был обнаружен и, если он и возможен, то в весьма специфических ситуациях, редко встречающихся на практике. Были найдены необходимые и достаточные условия того, что игровая модель имеет ровно одно оптимальное по Нэшу решение, соответствующее случаю, когда оба предприятия используют установку, а также достаточные условия в более простой формулировке.

В модели Штакельберга при упрощающих условиях были найдены оптимальные решения.

В пятой главе изучаются динамические модели конкуренции предприятий. Рассмотрим случай, когда на рынке конкурируют две фирмы (дуополия), - следующие далее утверждения и построения легко обобщаются на общий случай m фирм. Обозначим производство первой и второй фирмы в n -ый момент времени, который мы будем называть годом, через x_n и y_n соответственно, $n \geq 1$. В первый год конкуренции фирмы не владеют достаточно полной информацией друг о друге и поэтому предположение (естественное в теории Курно) о том, что они произведут количество продукта, равное равновесию Нэша, представляется слишком сильным и, возможно, не всегда реализующемся на практике. Кроме того, игровая модель может просто не иметь точки равновесия, - строящаяся модель годится и в этом случае.

Пусть предприятия произвели (x_1, y_1) продукции (эта пара чисел может быть близка к равновесию Нэша, если оно существует, или может отличаться от него). Обозначим через R_x и R_y функции реагирования фирм и предположим, что они определены всюду и однозначны. Тогда определим (x_2, y_2) - производство в следующем году так: $x_2 = R_x(y_1)$, $y_2 = R_y(x_1)$, то есть каждая фирма производит то количество продукта, которое максимизирует ее прибыль, в предположении, что конкурент не изменит мощность. Такое решение оправдывается тем, что вся информация о конкуренте, которой обладает фирма, - это количество продукции, произведенной конкурирующей организацией в прошлом году. Аналогично, для всех n $x_{n+1} = R_x(y_n)$, $y_{n+1} = R_y(x_n)$. Если обозначить через F функцию от двух вещественных переменных, определяемую так:

$$F(x, y) = (R_x(y), R_y(x)) \quad (5.1)$$

то (x_n, y_n) можно вычислить по формуле

$$(x_n, y_n) = \underbrace{F \circ \dots \circ F}_{n-1}(x_1, y_1) \quad (5.2)$$

В том случае, когда равновесие существует и равно (x^*, y^*) , оно является решением уравнения $F(x, y) = (x, y)$, то есть является неподвижной точкой функции F . Можно показать, что если функции R_x и R_y определены на одном и том же отрезке, скажем, $[0, 1]$ (игра на квадрате), непрерывны на нем и строго убывают, то оптимальное решение по Нэшу (x^*, y^*) всегда существует, и, если оно единственное, то при любом начальном значении $(x_1, y_1) \in [0, 1] \times [0, 1]$ (x_n, y_n) стремится к (x^*, y^*) при $n \rightarrow \infty$; это означает, что (x^*, y^*) - глобально устойчивое

равновесие игровой модели. Будет ли всегда равновесие игровой модели глобально или локально устойчивым, не ясно, но, скорее всего, нет. Вообще, свойство устойчивости точки равновесия представляется весьма важной характеристикой игры, а задача исследования устойчивости равновесия (возникающая столь естественно в нашей динамической модели), - имеющей самостоятельное значение.

В общем же случае равновесие может не существовать (или быть не единственным). И тогда поведение последовательности (x_n, y_n) может быть весьма разнообразным.

Рассмотрим игровую модель, в которой предприятия могут выбирать тип очистительной установки. Пусть эластичность спроса постоянна и больше единицы. Тогда, как показывают вычисления на компьютере, точка равновесия устойчива: на рисунке отмечен прямоугольник внутри которого любая последовательность сходится к (x^*, y^*) ; если же начальная точка (x_1, y_1) лежит вне прямоугольника, то через некоторое количество «шагов» одна из фирм разоряется. Цена установки равна нулю, что позволяет в любой момент времени «выключить» ее или «включить» (рис. 5.1).

Мы получим другую динамическую модель, если будем предполагать, что каждая из фирм - участников игры может прогнозировать стратегию конкурента: если $y_1, \dots, y_n$ - производство второй фирмы, то в $(n+1)$ - ый момент времени первая фирма производит $R_x(\overline{y_{n+1}})$ продукции, где $\overline{y_{n+1}}$ - величина, зависящая от $y_1, \dots, y_n$. Можно также предполагать, что существуют некоторые ограничения по

мощности, или что государство использует сложную систему штрафов - текущий штраф зависит от уровня загрязнения.

Поведение траекторий в базовой модели при различных начальных значениях переменных

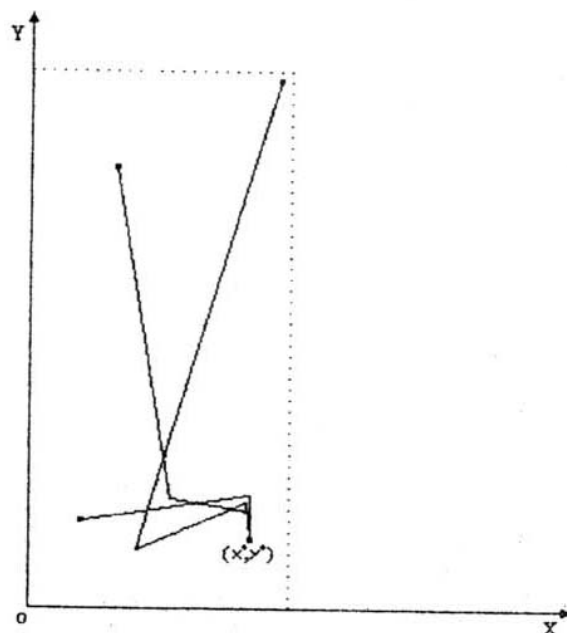


Рис. 5.1.

В шестой главе тестируются некоторые из построенных моделей. В этой главе приведены результаты тестирования некоторых моделей из предыдущих глав на параметрах, которые представляются весьма реалистичными. Например, в случае монополии, введение таких штрафов, при которых предприятию становится выгодно производить очистку, приводит к сокращению прибыли монополиста вдвое, цена на продукт увеличивается в полтора раза и производство падает почти вдвое. Эти результаты на качественном уровне хорошо согласуются с

известными фактическими данными, что может свидетельствовать о состоятельности модели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Дано математическое обоснование известного экономического эффекта связанного с тем, что природоохранительный налог не всегда обеспечивает двойную выгоду - улучшение состояния окружающей среды и получения наибольших доходов государственным бюджетом.
2. Определены условия реализации негативных эффектов, обусловленных неправильным выбором величины штрафа: при определенных значениях параметров как слишком малое, так и слишком большое значение штрафа приводит к вытеснению с рынка предприятия, использующего лучшую очистительную установку.
3. Построена игровая модель с двумя игроками - фирмами, стратегии которых представляют собой пары, включающие в себя тип очистительной установки и мощность; при некоторых предположениях доказано существование равновесия по Нэшу.
4. Разработано семейство динамических моделей конкуренции на олигополистическом рынке, учитывающих разные прогностические стратегии, разные системы штрафования, а также ограничения по мощности производства.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Красс Д.И., Недорезов Т.Л., Хлебопрос Р.Г. Экологическая индустрия: об оптимальном уровне штрафов за загрязнение окружающей среды// Инженерная экология, 2, 1999. - С. 23-27.
2. Красс Д.И., Недорезов Т.Л., Хлебопрос Р.Г. Негативный эффект выбора величины штрафа за загрязнение окружающей среды// Инженерная экология, 1, 2000. - С. 41-51.
3. Красс Д.И., Недорезов Т.Л., Хлебопрос Р.Г. Решение эколого-экономической задачи методами теории игр// Инженерная экология, 2, 2000.-С. 41-46.
4. Красс Д.И., Недорезов Т.Л., Хлебопрос Р.Г. Негативные эффекты при оптимальном выборе уровня штрафов за загрязнение окружающей среды. Новосибирск: Изд. центр ОНИ СО РАН, 2000. -32с.