
У Ч Е Б Н И К И
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ ЭКОНОМИКИ



А.А. Фридман

ЭКОНОМИКА ИСТОЩАЕМЫХ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

*Рекомендовано УМО в области экономики
и менеджмента в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
«Экономика»*



Издательский дом
Государственного университета — Высшей школы экономики

Москва 2010

УДК 330.15
ББК 65.04
Ф88

Издано при финансовой поддержке Федерального агентства
по печати и массовым коммуникациям в рамках
Федеральной целевой программы «Культура России»

Рецензенты:

доктор экономических наук, профессор экономического факультета
Воронежского государственного университета *Т.Н. Гоголева*;
кандидат экономических наук, старший научный сотрудник
Лаборатории системного анализа естественных монополий
Института системного анализа Российской академии наук *Е.М. Васильева*

ISBN 978-5-7598-0679-0

© Фридман А.А., 2010
© Оформление. Издательский дом
Государственного университета –
Высшей школы экономики, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	7
Раздел I. Основы теории истощаемых ресурсов.....	11
Глава 1. Модель добычи истощаемого природного ресурса при совершенной конкуренции: случай нулевых издержек.....	13
Глава 2. Модель добычи истощаемого ресурса в условиях совершенной конкуренции при наличии издержек.....	25
Глава 3. Эксплуатация нескольких месторождений истощаемого ресурса в условиях совершенной конкуренции	44
Глава 4. Добыча истощаемого ресурса в условиях совершенной конкуренции при наличии альтернативного неистощаемого ресурса.....	66
Литература к разделу I.....	84
Раздел II. Неопределенность и открытие новых месторождений	87
Глава 5. Добыча истощаемого природного ресурса и разведка новых месторождений.....	89
Глава 6. Добыча истощаемого ресурса и разведка новых запасов при неоднородности месторождений	98
Глава 7. Неопределенность и добыча истощаемых природных ресурсов.....	106
Литература к разделу II.....	116
Раздел III. Несовершенная конкуренция на рынках истощаемых ресурсов	119
Глава 8. Монополия на рынке истощаемого ресурса.....	121
Глава 9. Стратегические взаимодействия на рынке истощаемого природного ресурса.....	134
Глава 10. Доминирующая фирма на рынке истощаемого природного ресурса.....	144
Литература к разделу III	164

Раздел IV. Регулирование ресурсодобывающей отрасли	168
Глава 11. Налогообложение на рынке истощаемых ресурсов.....	170
Глава 12. Налогообложение в условиях несовершенной конкуренции.....	192
Глава 13. Эксплуатация месторождения несколькими компаниями: трагедия общин.....	201
Глава 14. Использование истощаемого ресурса при угрозе национализации.....	207
Глава 15. Истощаемые ресурсы и окружающая среда.....	220
Литература к разделу IV.....	229
Раздел V. Экономический рост при наличии истощаемых ресурсов	232
Глава 16. Экономический рост в экономике с истощаемыми природными ресурсами при экзогенной норме сбережения.....	234
Глава 17. Справедливость и экономический рост в экономике с истощаемыми ресурсами.....	249
Глава 18. Экономический рост в экономике с истощаемыми ресурсами: случай открытой экономики.....	264
Литература к разделу V.....	271
Раздел VI. Эмпирические исследования истощаемых ресурсов	275
Глава 19. Эмпирическая проверка теории Хотеллинга.....	277
Глава 20. Эмпирический анализ отраслевой структуры на рынках истощаемых природных ресурсов.....	288
Глава 21. Подходы к измерению редкости природных ресурсов.....	301
Литература к разделу VI.....	316
Раздел VII. Математическое приложение	321
Глава 22. Динамическая оптимизация.....	321
Литература к разделу VII.....	341
Раздел VIII. Задачи и решения	342

ПРЕДИСЛОВИЕ

Что изучает экономика истощаемых природных ресурсов?

Под истощаемыми ресурсами понимаются непроеизводимые или так называемые первичные товары, которые производят конечный поток услуг (в терминах приведенной стоимости) при условии ограниченности запаса данного ресурса. Таким образом, не все непроеизводимые товары будут предметом нашего анализа. Так, к примеру, земля при надлежащем ее использовании может, в принципе, производить неограниченный поток услуг и потому, согласно вышеприведенному определению, не относится к истощаемым природным ресурсам. Даже принимая во внимание возможность вторичного использования многих минералов (например, переплавку меди и др.), данные ресурсы являются истощаемыми, поскольку при вторичной переработке невозможно полностью извлечь сырье, использованное при изготовлении товара.

Поскольку рассматриваемые в курсе ресурсы являются истощаемыми, то экономические агенты при принятии решений должны учитывать тот факт, что, потребляя сегодня дополнительную единицу такого ресурса, они тем самым сокращают объем потребления, доступный в будущем. Игнорирование этого факта может привести к чрезмерно быстрому истощению запасов ресурса. Исследование вопросов оптимального потребления и ценообразования на истощаемые ресурсы необходимо проводить в рамках динамических моделей. Однако большинство моделей, рассматриваемых в традиционных курсах микроэкономики (которая и посвящена изучению вопросов ценообразования), являются статическими, а потому они не применимы к анализу истощаемых природных ресурсов. Данный курс призван заполнить этот пробел, рассмотрев динамические модели ценообразования на истощаемые ресурсы при различных рыночных структурах.

Основоположником теории истощаемых природных ресурсов считается Гарольд Хотеллинг. В своей работе, вышедшей в 1931 г. под

названием «Экономика истощаемых ресурсов»¹, он проанализировал динамику цен и добычи истощаемого ресурса в условиях совершенной конкуренции и монополии, а также рассмотрел различные варианты налогового регулирования данной отрасли.

Структура курса

Курс лекций поделен на несколько ключевых разделов. Первый посвящен базовым теоретическим моделям, лежащим в основе современных работ по данной тематике. В этом разделе выводятся характеристики оптимальной траектории использования известного запаса истощаемого ресурса, формулируется задача репрезентативной ресурсодобывающей фирмы и доказывается первая теорема благосостояния об оптимальности равновесной траектории добычи в условиях совершенной конкуренции.

Второй раздел описывает развитие базовой модели Хотеллинга в двух направлениях. Во-первых, модифицируется предпосылка о неизменности запаса ресурса посредством введения возможности открытия новых месторождений в результате геологоразведочных работ. Во-вторых, рассматривается влияние неопределенности относительно запаса ресурса, спроса на ресурс и момента появления истощаемого ресурса-заменителя на характеристики оптимальной и равновесной траекторий добычи.

В третьем разделе исследуются различные рыночные структуры ресурсодобывающей отрасли. Начинается он с анализа монополии. Далее рассматриваются варианты стратегического взаимодействия фирм, начиная с классической конкуренции выпусков в стиле модели Курно как в симметричном, так и несимметричном случаях (т.е. при различии в предельных издержках добычи и/или запасах истощаемых ресурсов). Затем анализируется отрасль с доминирующей фирмой.

Четвертый раздел изучает вопросы государственного регулирования отрасли. В нем рассматриваются всевозможные варианты изъ-

¹ Hotelling H. The Economics of Exhaustible Resources // Journal of Political Economy. 1931. Vol. 39. № 2. P. 137–175.

тия природной ренты посредством налогов и исследуется влияние налогов на эффективность добычи в условиях различных рыночных структур. Также рассматривается динамическая версия трагедии общин, возникающая в результате диффузии ресурса в месторождении, и проводится анализ корректирующей налоговой политики. В этом же разделе анализируется вопрос прав собственности на месторождения и реакции добывающих компаний на угрозу национализации ресурса. Наконец, завершается раздел исследованием вопросов влияния добычи истощаемых ресурсов на окружающую среду и корректирующей политики государства.

В пятом разделе анализируются истощаемые ресурсы в контексте макроэкономических моделей долгосрочного экономического роста. В частности, изучается вопрос устойчивости развития экономики при истощаемости природных ресурсов.

Шестой раздел посвящен эмпирическим исследованиям в области экономики истощаемых ресурсов и подходам к оценке редкости. Рассматриваются различные варианты эмпирической проверки теоретических моделей, представленных в разделах I–III.

Седьмой раздел содержит математическое приложение, в котором приводятся основные сведения по динамической оптимизации, на которой базируются представленные в курсе модели.

Наконец, в последнем разделе представлены примеры задач с указанием разделов, к которым они относятся. Все задачи снабжены ответами или указаниями к решению со ссылками на соответствующие статьи, а к ряду задач приведены полные решения.

В конце каждого раздела размещены список основной литературы, а также аннотированный список дополнительной литературы для более глубокого изучения предмета.

**Какими знаниями нужно обладать,
приступая к изучению данного курса?**

Модели, анализируемые в курсе, основаны на методах динамической оптимизации, и потому освоение курса требует не только познаний в

области микроэкономики, теории промышленной организации, макроэкономики, но и соответствующей математической культуры. Необходимый математический аппарат включает дифференциальное и интегральное исчисления, методы оптимизации, теорию оптимального управления.

Эмпирический анализ предполагает наличие определенной квалификации в использовании эконометрических методов.

Благодарности

В основу пособия легли лекции, прочитанные студентам Государственного университета – Высшей школы экономики в 2005–2008 гг. Идея создания данного курса принадлежит профессору М.И. Левину, за что я ему премного благодарна.

Ключевую роль в появлении книги сыграли студенты магистерской программы «Экономическое моделирование и экономическая политика», вопросы и замечания которых позволили существенно расширить спектр проблем, нашедших отражение в данном пособии.

Создание пособия стало возможно благодаря финансовой поддержке, полученной в рамках инновационной образовательной программы, реализуемой Государственным университетом – Высшей школой экономики в 2007 г.

Издание книги было бы невозможно без кропотливой работы редакторов О.В. Осиповой и Л.А. Моисеенко, благодаря которым удалось исправить множество неточностей в тексте и превратить рукопись в готовый продукт, за что я им выражаю глубокую признательность.

I

раздел

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИСТОЩАЕМЫХ РЕСУРСОВ

В данном разделе рассматривается классическая постановка задачи выбора оптимальной траектории добычи ресурса, запас которого задан и не может пополняться. Эта задача, а также некоторые ее модификации были исследованы Хотеллингом в 1931 г. В первой главе анализируется простейшая модель, где отсутствуют издержки добычи ресурса, однако эта упрощающая предпосылка опускается при дальнейшем анализе.

Исследование проводится в рамках совершенно конкурентной отрасли. Главная особенность ценообразования при истощаемости ресурса заключается в том, что цена включает не только предельные издержки добычи (как это было в традиционных статических моделях в условиях совершенной конкуренции), но и вторую компоненту, отражающую редкость ресурса или ренту. Как показано в данном разделе, в равновесии рента растет постоянным темпом, равным ставке процента. Это правило, называемое правилом Хотеллинга, выводится как непосредственно из решения соответствующей модели частичного равновесия, так и альтернативным способом. Рассматривая истощаемый ресурс как актив, правило Хотеллинга можно получить, опираясь на теорию отсутствия арбитража.

В первой главе также приведена модель централизованной экономики, в которой максимизируется суммарная приведенная стоимость совокупного излишка общества, т.е. используется утилитаристский подход, который описан подробнее в главе 17. Доказано, что равновесная траектория добычи оказывается оптимальной в условиях

совершенной конкуренции, т.е. выполняется динамический вариант первой теоремы благосостояния.

Во второй главе рассматривается модификация базовой модели при наличии издержек добычи и исследуется зависимость траектории добычи и цен от предельных издержек добычи, запаса ресурса и процентной ставки. Анализ ситуации, где издержки добычи растут по мере истощения запаса ресурса, показывает, что ресурс не всегда будет извлекаться полностью и, более того, в этом случае цены могут не расти, как в модели Хотеллинга, а падать.

Третья глава посвящена анализу модели с неоднородными месторождениями, различающимися предельными издержками добычи ресурса. Показано, что в этом случае месторождения будут разрабатываться последовательно от более дешевого к более дорогому в соответствии с принципом, открытым Герфиндалем.

Наконец, в четвертой главе исследуется влияние альтернативного неистощаемого ресурса-заменителя на добычу истощаемого ресурса. Рассматриваются ситуации, где ресурс-заменитель первоначально доступен, а также модели, где заменитель появится лишь в будущем, причем этот момент может быть известен заранее или может иметь место неопределенность относительно момента появления этого ресурса.

Глава 1

Модель добычи истощаемого природного ресурса при совершенной конкуренции: случай нулевых издержек

Задача репрезентативной фирмы

Рассмотрим отрасль, добывающую истощаемый природный ресурс. Сначала будем предполагать, что начальный запас данного ресурса нам известен и равен величине S_0 . Позже данное предположение будет модифицировано и возможность открытия новых месторождений будет также включена в модель. Объем добычи ресурса в момент времени t обозначим через R_t . Будем считать, что для рассматриваемого ресурса вторичная переработка ресурса невозможна. Таким образом, запас ресурса будет истощаться по мере добычи согласно правилу

$$\dot{S}_t = -R_t. \quad (1-1)$$

Добыча ресурса и запас должны быть неотрицательны в каждый момент времени, а запас в нулевой момент времени должен соответствовать величине S_0 :

$$R_t \geq 0, \quad S_t \geq 0, \quad S_0 \text{ задано.} \quad (1-2)$$

Траекторию добычи ресурса, удовлетворяющую условиям (1-1) и (1-2), называют допустимой.

Будем предполагать, что услуги, создаваемые данным ресурсом, соответствуют объему его добычи. Рассмотрим функционирование ресурсодобывающей отрасли в условиях совершенной конкуренции. Для удобства предположим, что добыча осуществляется репрезентативной фирмой, которая воспринимает цены на добываемый ресурс как данные. Начнем анализ с простейшего случая, предполагая отсутствие издержек по добыче и транспортировке ресурса. Тогда це-

на p_t , по которой будет продана единица ресурса в периоде t , будет являться не только выручкой на единицу ресурса, но и прибылью, или рентой, владельца этого ресурса. Задача ресурсодобывающей компании заключается в выборе траектории добычи, максимизирующей суммарную приведенную стоимость прибыли от добычи и продажи ресурса:

$$\begin{aligned} \max \int_0^{\infty} p_t R_t e^{-rt} dt, \\ \dot{S}_t = -R_t, \\ R_t \geq 0, S_t \geq 0, \\ S_0 \text{ задано,} \end{aligned} \quad (1-3)$$

где r – ставка процента, которая предполагается неизменной во времени.

Решим данную задачу, используя принцип максимума Понтрягина¹. Для этого запишем гамильтониан (в терминах приведенной стоимости), обозначив сопряженную функцию через λ_t .

$$H_t = p_t R_t e^{-rt} - \lambda_t R_t.$$

Дифференцируя гамильтониан по объемам добычи и запаса ресурса, выпишем условия первого порядка:

$$\partial H_t / \partial R_t = p_t e^{-rt} - \lambda_t \leq 0 \text{ и } \partial H_t / \partial R_t = 0, \text{ если } R_t > 0, \quad (1-4)$$

$$-\partial H_t / \partial S_t = \dot{\lambda}_t \text{ или } 0 = \dot{\lambda}_t. \quad (1-5)$$

Поскольку рассматривается задача со свободным правым концом, то решение задачи (1-3) должно удовлетворять условию трансверсальности:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_t S_t = 0. \quad (1-6)$$

¹ Подробнее о принципе максимума и других подходах к решению задач динамического программирования можно прочитать в математическом приложении к данному курсу, см. раздел VII.

Из производной по запасам (1-5) находим, что значение сопряженной функции не меняется со временем, т.е. $\lambda_t = \lambda$ для любого t . Подставляя в условие первого порядка (1-4), получим, что при положительной добыче

$$p_t = \lambda e^{rt}.$$

Продифференцируем это условие по времени:

$$\dot{p}_t = r\lambda e^{rt} \text{ или } \dot{p}_t = rp_t.$$

Таким образом, траектория добычи должна быть такова, что результирующая цена ресурса растет постоянным темпом, равным ставке процента:

$$\dot{p}_t / p_t = r. \quad (1-7)$$

Данное условие в экономической литературе называют правилом Хотеллинга. Полученное правило вполне согласуется с интуицией. Если бы цена ресурса росла медленнее ставки процента, то выгодно было бы добыть и продать ресурс немедленно. В противном случае, напротив, следовало бы отсрочить добычу ресурса.

Поскольку $\lambda_t = \lambda$, то условие трансверсальности (1-6) примет вид $\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_t S_t = \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda S_t = \lambda \lim_{t \rightarrow \infty} S_t = 0$, что при $\lambda \neq 0$ влечет $\lim_{t \rightarrow \infty} S_t = 0$.

Альтернативный вариант вывода правила Хотеллинга

Для того чтобы понять суть полученного выше правила, рассмотрим альтернативный подход к задаче выбора наилучшей с точки зрения фирмы траектории добычи ресурса, считая запас ресурса активом и используя теорию арбитража.

Пусть время дискретно. Рассмотрим промежуток времени длины θ от t до $t + \theta$. Пусть в момент времени t агент имеет единицу истощаемого ресурса. Если он добудет и продаст эту единицу в настоящий момент, то получит прибыль, равную цене единицы ресурса,

p_t , поскольку в силу сделанного ранее предположения издержки добычи и транспортировки отсутствуют. Если r – ставка процента, соответствующая единичному отрезку времени, то процентные платежи за период длиной θ составят $r\theta$ на единицу вложений. Таким образом, в случае немедленной продажи актива к концу рассматриваемого периода агент будет иметь сумму, равную $p_t(1+r\theta)$. Альтернативой мгновенной продажи ресурса является продажа ресурса в следующем периоде, т.е. в момент времени $t+\theta$ по цене $p_{t+\theta}$. Агенту будет все равно продавать ресурс в момент t или $t+\theta$, если выполнено условие

$$p_t(1+r\theta) = p_{t+\theta}.$$

Преобразовав это уравнение и устремив длину временного интервала θ к нулю, получим правило Хотеллинга:

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{p_{t+\theta} - p_t}{\theta p_t} = r \text{ или } \dot{p}_t / p_t = r.$$

Таким образом, даже при неизменной во времени (но положительной) ставке процента цена истощаемого ресурса не остается неизменной, а растет постоянным темпом. Полученный вывод означает, что сам по себе рост цен на истощаемые ресурсы не является свидетельством монопольной власти.

Равновесие в условиях совершенной конкуренции

Итак, цены на истощаемые ресурсы в условиях совершенной конкуренции растут постоянным темпом, но каковы эти цены и каковы соответствующие объемы добычи? Для ответа на этот вопрос необходима информация о спросе на истощаемый природный ресурс. Пусть спрос на ресурс задается неизменной во времени убывающей по цене ресурса функцией $D(p)$. Поскольку функция спроса монотонна, то существует обратная функция $p(R)$. Будем предполагать, что $\lim_{R \rightarrow 0} p(R) \rightarrow \infty$ (например, этим условиям удовлетворяет функция спроса с постоянной ценовой эластичностью).

В равновесии в каждый момент времени спрос должен быть равен предложению ресурса, т.е. его добыче:

$$D(p_t) = R_t \quad \forall t. \quad (1-8)$$

Заметим, что при введенных предпосылках добыча будет положительна в каждый момент времени, поскольку при $R \rightarrow 0$ потребители готовы заплатить бесконечно много за дополнительную единицу ресурса.

Выведенное выше правило Хотеллинга (1-7) вместе с условиями равновесия (1-8) и условием трансверсальности (1-6) позволяют определить цены и объемы добычи для каждого момента времени.

Утверждение 1.1. Цены и объемы добычи истощаемого ресурса в случае совершенно конкурентной отрасли с нулевыми издержками добычи определяются из решения следующей системы:

$$\begin{cases} p_t = p_0 e^{rt}, \\ D(p_t) = R_t, \\ \int_0^{\infty} R_t dt = S_0. \end{cases}$$

Доказательство.

Правило Хотеллинга говорит о том, что цены будут расти постоянным темпом. Решив дифференциальное уравнение (1-7), найдем

$$p_t = p_0 e^{rt}. \quad (1-9)$$

Однако существует континуум различных траекторий цен, удовлетворяющих условию (1-9). Какова же будет цена ресурса в начальный момент времени? Определив начальную цену, мы получим цены и для любого другого момента времени и, основываясь на информации о функции спроса (1-8), определим соответствующие объемы добычи.

Обратимся к условию трансверсальности (1-6). Покажем, что $\lambda \neq 0$. Иначе $p_t = \lambda e^{rt} = 0$ для любого момента времени с положитель-

ной добычей. Спрос при этом будет положителен и одинаков в каждый момент времени, а запас ресурса ограничен, что приведет к исчерпанию запаса за конечный интервал. Однако это означает, что в последующие периоды спрос не будет удовлетворен, т.е. данная ситуация невозможна в равновесии. Таким образом, мы заключаем, что в пределе запас ресурса должен устремиться к нулю: $\lim_{t \rightarrow \infty} S_t = 0$.

Учитывая, что запас изменяется только в силу добычи, данное условие означает, что совокупная добыча будет в точности равна запасу истощаемого ресурса. Действительно, $S_t = S_0 - \int_0^t R_\tau d\tau$ и, соответственно,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} S_t = S_0 - \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t R_\tau d\tau = 0$$

или

$$\int_0^\infty R_t dt = S_0. \quad (1-10)$$

Поскольку в равновесии добыча определяется функцией спроса, то полученное условие позволяет найти начальную цену ресурса из решения уравнения

$$\int_0^\infty R_t dt = \int_0^\infty D(p_t) dt = \int_0^\infty D(p_0 e^{rt}) dt = S_0. \quad \blacksquare$$

Проиллюстрируем описанный процесс поиска равновесия, рассмотрим отрасль, где спрос на ресурс обладает постоянной ценовой эластичностью.

Пример 1.1. Равновесие для отрасли с постоянной эластичностью спроса.

Пусть спрос на ресурс задан функцией вида

$$D(p_t) = (p_t)^{-\alpha}, \quad \text{где } \alpha > 0.$$

Подставляя данную функцию в условие равновесия (1-8), с учетом правила Хотеллинга находим, что добыча будет сокращаться постоянным темпом, равным αr :

$$R_t = D(p_t) = (p_t)^{-\alpha} = (p_0)^{-\alpha} e^{-\alpha r t}.$$

Теперь найдем совокупную добычу и, приравнявая к величине первоначального запаса ресурса, получим следующее уравнение для определения первоначальной цены:

$$\int_0^{\infty} R_t dt = (p_0)^{-\alpha} \int_0^{\infty} e^{-\alpha r t} dt = -\frac{(p_0)^{-\alpha}}{\alpha r} e^{-\alpha r t} \Big|_0^{\infty} = \frac{(p_0)^{-\alpha}}{\alpha r} = S_0.$$

Решив данное уравнение относительно p_0 , определим значение цены в начальный момент времени

$$p_0 = \frac{1}{(\alpha r S_0)^{1/\alpha}}. \quad (1-11)$$

Заметим, что начальное значение цены будет тем ниже, чем больше запас ресурса и чем выше ставка процента.

В результате равновесные траектории цен и добычи имеют вид

$$p_t = (\alpha r S_0)^{-1/\alpha} e^{rt} \text{ и } R_t = \alpha r S_0 e^{-\alpha r t}.$$

Найденные траектории схематично изображены на рис. 1.1.

Как было показано выше на основе анализа условия трансверсальности, первоначальная цена должна установиться на таком уровне, при котором совокупная добыча будет равняться первоначальному запасу ресурса. Эта цена обозначена на рисунке через p_0 . Поясним экономический смысл данного результата. Для этого рассмотрим, что произойдет, если первоначальная цена окажется ниже p_0 : $\underline{p} < p_0$. В этом случае и в каждый последующий момент времени цена будет ниже: $\underline{p}_t < p_t$, а, соответственно, в силу убывания спроса по цене, добыча будет выше, как показано на рис. 1.1.

Траектории цен и добычи, соответствующие более низкой первоначальной цене, изображены пунктиром. В этом случае запас ресурса будет исчерпан за конечный промежуток времени. Вопрос в том, может ли такая ситуация иметь место? Пусть весь запас ресурса будет добыт к моменту времени T . Тогда потребители после исчерпания ресурса готовы заплатить за него сколь угодно высокую цену. Производители ресурса, прогнозируя подобный скачкообразный рост цен, сочтут выгодным изменить траекторию добычи, сократив добычу при приближении момента T с тем, чтобы продать этот ресурс позже по более высокой цене. В свою очередь, снижение добычи приведет к росту цен и, таким образом, отрасль вернется к начальной цене p_0 .

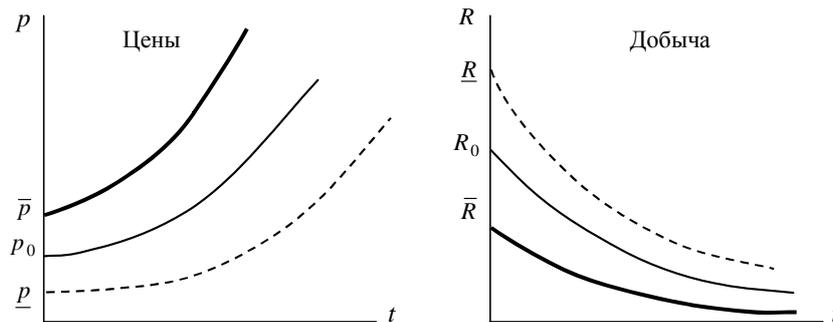


Рис. 1.1. Траектории цен и добычи для совершенно конкурентной отрасли

Аналогично можно показать, что первоначальная цена не может быть выше p_0 . Действительно, если бы это было так, и $\bar{p} > p_0$, то и во все последующие моменты времени цена была бы выше, а добыча соответственно ниже, как показано на рис. 1.1. Траектории цен и добычи для более высокой первоначальной цены изображены утолщенной линией. Если темпы добычи будут низкими, то ресурс не будет исчерпан полностью. Таким образом, данная ситуация неэффективна: дифференциально малое снижение первоначальной цены позволило бы увеличить в этой ситуации добычу в каждый момент времени, не исчерпав при этом запас ресурса.

Заметим, что особенность рассмотренной функции спроса в том, что при любой сколь угодно высокой цене потребители готовы приобрести ненулевое количество данного ресурса, а потому в любой момент времени добыча положительна. Для многих функций спроса ситуация выглядит несколько иначе. Ниже рассмотрен случай линейной функции спроса, для которой даже при нулевой добыче максимальная готовность заплатить за дополнительную единицу ресурса конечна. В результате ресурс будет исчерпан за конечный временной интервал.

Пример 1.2. Равновесие для отрасли с переменной эластичностью спроса.

Пусть спрос на ресурс задается функцией вида

$$D(p_t) = \begin{cases} A - p_t, & p_t \leq A, \\ 0, & p_t > A, \text{ где } A > 0. \end{cases}$$

В данном случае неограниченный рост цены невозможен, так как при $p_t > A$ спрос будет равен нулю. В результате находим, что в момент времени T добыча ресурса закончится, причем $p_T = p_0 e^{rT} = A$, откуда находим период эксплуатации месторождения

$$T = \frac{\log(A/p_0)}{r}.$$

Заметим, что за период от 0 до T ресурс будет извлечен полностью. Действительно, в этой модели $\lambda \neq 0$. Иначе $p_t \leq \lambda e^{rt} = 0$ для любого t . Соответственно, спрос будет положителен и равен $D(0) = A$. Однако запас ресурса конечен и будет исчерпан за конечный отрезок времени, и впоследствии на рынке образуется избыточный спрос, что невозможно в равновесии. Итак, $\lambda \neq 0$, откуда в силу условия трансверсальности находим, что

$$\lim_{t \rightarrow \infty} S_t = S_0 - \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t R_\tau d\tau = 0 \text{ или } \int_0^\infty R_t dt = S_0.$$

Поскольку в каждый момент времени спрос на ресурс должен быть равен добыче, то $R_t = \begin{cases} A - p_0 e^{rt}, & t \leq T, \\ 0, & t > T. \end{cases}$ Таким образом, совокупная добыча составит

$$\int_0^T (A - p_0 e^{rt}) dt = AT - p_0 \int_0^T e^{rt} dt = AT - p_0 (e^{rT} - 1) / r = S_0.$$

Подставляя полученное выше выражение для периода эксплуатации T , находим уравнение, из которого определяется начальная цена

$$A \log(A / p_0) + p_0 = rS_0 + A.$$

Несложно проверить, что начальная цена, как и в случае спроса с постоянной эластичностью, будет тем ниже, чем больше запас ресурса и выше процентная ставка:

$$\frac{dp_0}{dS_0} = -\frac{-r}{1 - A/p_0} = -\frac{r}{A/p_0 - 1} < 0 \quad \text{и} \quad \frac{dp_0}{dr} = -\frac{S_0}{A/p_0 - 1} < 0,$$

так как $p_0 < A$.

Кроме того, начальная цена будет тем ниже, чем меньше спрос на ресурс $\frac{dp_0}{dA} = -\frac{\log A/p_0}{1 - A/p_0} = \frac{\log A/p_0}{A/p_0 - 1} > 0$, так как $A > p_0$.

Добыча ресурса в случае централизованной экономики

Покажем, что полученные выше равновесные траектории будут в точности совпадать с траекториями для централизованной экономики. Таким образом, и в случае исключаемых природных ресурсов совершенно конкурентное равновесие при наличии полной системы рынков приводит к Парето-оптимальному распределению ресурсов, т.е. имеет место первая теорема благосостояния.

Поскольку рассматривается модель частичного равновесия, то Парето-оптимальное распределение ресурсов может быть получено

как решение задачи максимизации совокупного излишка. Валовой потребительский излишек в момент t можно записать как интеграл от обратной функции спроса на истощаемый ресурс

$$u(R_t) \equiv \int_0^{R_t} p(\tilde{R}) d\tilde{R}, \quad (1-12)$$

где $p(R) = D^{-1}(R)^2$. Будем считать, что $u'(R) > 0$. Поскольку согласно введенным выше предположениям издержки добычи и транспортировки отсутствуют, то задача в случае централизованной экономики сводится к максимизации приведенной стоимости валовых потребительских излишков при условии постепенного истощения месторождения:

$$\begin{aligned} \max \int_0^{\infty} u(R_t) e^{-rt} dt, \\ \dot{S}_t = -R_t, \\ R_t \geq 0, S_t \geq 0, \\ S_0 \text{ задано.} \end{aligned} \quad (1-13)$$

Обозначив сопряженную функцию через ϕ_t , запишем гамильтониан в терминах приведенной стоимости:

$$H_t = u(R_t) e^{-rt} - \phi_t R_t.$$

Выпишем условия первого порядка для внутреннего решения:

$$\partial H_t / \partial R_t = 0 \text{ или } u'(R_t) e^{-rt} = \phi_t, \quad (1-14)$$

$$-\partial H_t / \partial S_t = \dot{\phi}_t \text{ или } 0 = \dot{\phi}_t. \quad (1-15)$$

Условие трансверсальности примет вид

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \phi_t S_t = 0. \quad (1-16)$$

² Заметим, что обратная функция существует в силу предпосылки о монотонности функции спроса.

Из производной по запасам (1-15) находим, что сопряженная функция является константой $\varphi_t = \varphi$ для любого t , причем эта константа положительна в силу предпосылки о положительности предельной полезности ресурса:

$$\varphi = u'(R_t)e^{-rt} > 0. \quad (1-17)$$

Таким образом, из условия трансверсальности следует, что ресурс будет израсходован полностью на бесконечном временном интервале:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_t S_t = \varphi \lim_{t \rightarrow \infty} S_t = 0 \text{ или } \lim_{t \rightarrow \infty} S_t = 0. \quad (1-18)$$

Найдем предельную полезность ресурса, продифференцировав (1-12) по добыче:

$$u'(R_t) \equiv \left(\int_0^{R_t} p(\tilde{R}) d\tilde{R} \right)'_{R_t} = p(R_t).$$

Подставив это выражение для предельной полезности в (1-17), находим:

$$p_t = \varphi e^{rt} \text{ или } \dot{p}_t = rp_t. \quad (1-19)$$

Таким образом, мы снова получили правило Хотеллинга. Итак, вдоль оптимальной траектории цены растут постоянным темпом, равным ставке процента. Цена в начальный момент времени на оптимальной траектории должна быть такова, чтобы кумулятивная добыча в точности равнялась запасу. Таким образом, весь запас ресурса будет исчерпан в соответствии с условием (1-18). Полученный набор характеристик оптимальной траектории в точности совпадает с условиями (1-6)–(1-8), характеризующими равновесную траекторию, откуда можно заключить, что равновесная траектория будет оптимальной.

Ф88

Фридман, А. А. Экономика истощаемых природных ресурсов [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. А. Фридман ; Гос. ун-т — Высшая школа экономики. — М. : Изд. дом Гос. ун-та — Высшей школы экономики, 2010. — 399, [1] с. — (Учебники Высшей школы экономики). — 2000 экз. — ISBN 978-5-7598-0679-0 (в пер.).

Пособие является первым систематическим изложением экономической теории истощаемых природных ресурсов, освещающим как классические, так и современные исследования по данной проблематике. Курс демонстрирует возможность применения инструментов микро- и макроэкономического анализа к исследованию вопросов функционирования рынков истощаемых природных ресурсов и влияния истощаемых природных ресурсов на долгосрочный экономический рост.

Рассмотрение истощаемых природных ресурсов как актива позволяет применить к природным ресурсам подходы к оценке активов, известные из теории финансов. Модели, анализируемые в курсе, основаны на методах динамической оптимизации, и потому освоение курса требует не только познаний в области микро- и макроэкономики, но и соответствующей математической культуры. Эмпирический анализ предполагает наличие определенной квалификации в использовании эконометрических методов.

Для студентов магистратуры и аспирантов экономических специальностей, а также для преподавателей, читающих курсы по экономике природных ресурсов.

УДК 330.15
ББК 65.04

Учебное издание

Серия «Учебники Высшей школы экономики»

Фридман Алла Александровна

Экономика истощаемых природных ресурсов

Зав. редакцией *Е.А. Бережнова*

Редактор *О.В. Осипова*

Художественный редактор *А.М. Павлов*

Компьютерная верстка и графика: *Л.А. Моисеенко*

Корректор *О.В. Осипова*

Подписано в печать 20.10.2009. Формат 60×88¹/₁₆
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 24,25. Уч.-изд. л. 17,85
Тираж 2000 экз. Изд. № 1036

Государственный университет – Высшая школа экономики.
125319, Москва, Кочновский проезд, д. 3
Тел./факс: (495) 772-95-71