

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

А. А. Фридман¹

канд. экон. наук, доцент кафедры микроэкономического анализа Государственного университета — Высшей школы экономики (Москва)

ИНВЕСТИЦИИ В ВОДОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Введение

Одна из особенностей водных ресурсов состоит в том, что не вся забранная из природных источников вода утилизируется агентом, а часть использованной воды возвращается обратно в природные источники. Возвратные потоки воды существенно варьируются по отраслям экономики. Согласно данным, приведенным в работе (Shiklomanov, 2003), наибольший коэффициент безвозвратного водопотребления имеет место в сельском хозяйстве, а далее по нисходящей следуют ЖКХ и промышленность. Величина коэффициента безвозвратного водопотребления зависит как от специфики отрасли, так и от используемых технологий водопотребления и водоотведения. Использование более эффективных технологий позволяет снизить коэффициент безвозвратного водопотребления, что способствует сбережению ограниченного запаса подземных вод.

В литературе существует целый ряд работ, посвященных водосберегающим технологиям, особенно применительно к сельскому хозяйству. Так, (Dinar, Zilberman, 1991) рассматривают вопрос об использовании эффективных технологий при ирригации в рамках статической модели частичного равновесия. Проведенное авторами эмпирическое исследование показало, что использование современных ирригационных систем позволяет существенно снизить влияние различий в погодных условиях и типах почвы на прибыльность производства. Также было показано, что выбор технологии зависит от характеристик выращиваемой культуры.

В работе (Chakravorty, Hochman, Zilberman, 1995) в рамках статической пространственной модели, где потребители различаются по своему местоположению, исследуются вопросы эффективного управления водными ресурсами при наличии потерь при транспортировке и инвестиции в снижение этих потерь. Существенным недостатком этой работы является игнорирование возможности пополнения подземных вод за счет потерь поверхностных вод в процессе транспортировки.

Возможность пополнения запаса подземных вод за счет потерь при транспортировке была учтена в модифицированной версии модели, изложенной в работе (Chakravorty, Umetsu, 2003). Однако авторы отказались от анализа инвестиций в водосберегающую технологию, рассматривая уровень потерь как неизменную экзогенную величину.

¹ Эл. адрес: alla_friedman@hotmail.com

Данная работа отличается от существующих исследований по целому ряду направлений. Во-первых, анализ базируется на динамической модели, что позволяет учесть не только мгновенный эффект от внедрения более совершенной технологии, но и будущие эффекты. Во-вторых, рассматриваются не потери при транспортировке, естественный процесс возврата сточных вод. Соответственно, рассматриваемые инвестиции в технологию водоотведения напрямую способствуют консервации запаса подземных вод за счет увеличения возвратного потока.

Описание модели

Рассмотрим модификацию модели, представленной в работе (Фридман, 2008), введя в модель инвестиции в водосберегающую технологию. Для упрощения анализа будем предполагать, что в некоем регионе единственным источником водоснабжения являются подземные воды с первоначальным запасом S_0 с естественным уровнем пополнения \bar{g} ¹. До внедрения водосберегающей технологии уровень безвозвратного водопотребления равен δ , т. е. динамика запаса подземных вод описывается уравнением $\dot{S}_t = \bar{g} - \delta g_t$, где g_t — водопотребление в момент t .

Внедрение технологии, позволяющей увеличить возвратный поток неупотребленной воды в природные источники региона, позволит снизить коэффициент безвозвратного водопотребления до величины $\tilde{\delta} < \delta$, но стоимость соответствующего проекта составляет величину F .

Пусть валовой потребительский излишек от использования воды задается функцией $u(g)$, причем $u(0) = 0$, $u'(g) > 0$, $u''(g) < 0$, а издержки извлечения и транспортировки подземных вод задаются функцией $C(g)$, где $C'(g) > 0$, $C''(g) \geq 0$. Будем также считать, что пополняемый запас подземных вод относительно мал для удовлетворения спроса, т. е. $C'(\bar{g}/\delta) < u'(\bar{g}/\delta)$ ². Тогда эффективное решение об инвестициях можно получить из следующей задачи максимизации совокупного излишка

$$\begin{aligned} & \max_{g_t, T \geq 0} \int_0^{\infty} (u(g_t) - C(g_t))e^{-rt} dt - Fe^{-rT}; \\ & \dot{S}_t = \bar{g} - \delta g_t, \quad t < T; \\ & \dot{S}_t = \bar{g} - \tilde{\delta} g_t, \quad t \geq T; \\ & S_t \geq 0, \quad S_0 \text{ — задано.} \end{aligned}$$

Решим данную задачу в два этапа. Пусть в момент T осуществлены инвестиции в водосберегающую технологию, а запас подземных вод к этому моменту составляет S_T . Тогда далее общество имеет дело с задачей вида

$$\begin{aligned} & V(T, S_T) = \max_{g_t \geq 0} \int_T^{\infty} (u(g_t) - C(g_t))e^{-rt} dt; \\ & \dot{S}_t = \bar{g} - \tilde{\delta} g_t, \quad t \geq T; \\ & S_t \geq 0, \quad S_0 \text{ — задано.} \end{aligned} \quad (1)$$

Теперь перейдем непосредственно к задаче, определяющей оптимальный момент для инвестирования в водосберегающую технологию

¹ Результаты анализа не изменятся, если ввести в модель альтернативный неистощаемый ресурс-заменитель с постоянными предельными издержками c_1 .

² Если бы это было не так и запаса пополняемого ресурса было бы достаточно для удовлетворения потребностей, то не было бы и стимула для увеличения возвратного потока вод.

$$\begin{aligned} & \max_{g_t, T \geq 0} \int_T^{\infty} (u(g_t) - C(g_t))e^{-rt} dt + Fe^{-rT} + V(T, S_T); \\ & \dot{S}_t = \bar{g} - \delta g_t; \\ & S_t \geq 0, S_0 - \text{задано.} \end{aligned} \quad (2)$$

Пусть λ_t — сопряженная функция, отражающая теневую оценку запаса в задаче (2). Тогда гамильтониан в терминах приведенной стоимости примет вид

$$H_t = (u(g_t) - C(g_t))e^{-rt} + \lambda_t(\bar{g} - \delta g_t).$$

Обозначим предельные издержки подземного водоснабжения через $c_g \equiv C'_g(g_t)$. Выпишем условия первого порядка

$$u'(x_t) \begin{cases} \leq c_g + \delta \lambda_t e^{rt}; \\ = c_g + \delta \lambda_t e^{rt}, \text{ если } g_t > 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\dot{\lambda}_t \begin{cases} = 0, \text{ если } S_t > 0; \\ \leq 0, \text{ если } S_t = 0. \end{cases} \quad (4)$$

При этом условии трансверсальности, определяющее остаточный запас ресурса на момент T , примет вид

$$\lambda_T = (V(T, S_T)e^{-rT})'_{S_T}. \quad (5)$$

Кроме того, должно выполняться условие трансверсальности, определяющее выбор момента инвестиций T

$$H_T^- = -\frac{d}{dT}((V(T^+, S_T) - F)e^{-rT^+}) = -\frac{d}{dT}(V(T^+, S_T)e^{-rT^+}) - rFe^{-rT^+},$$

откуда

$$H_T^- + rFe^{-rT^+} = -\frac{d}{dT}(V(T^+, S_T)e^{-rT^+}). \quad (6)$$

Заметим, что $V(T^+, S_T)e^{-rT^+} = \int_T^{\infty} (u(\tilde{g}_t) - C(\tilde{g}_t))e^{-rt} dt$, где \tilde{g}_t — оптимальная траектория для задачи (1). Тогда, следуя подходу (Hadley Kemp, 1971, p. 117–120), находим

$$-\frac{d}{dT}(V(T^+, S_T)e^{-rT^+}) = e^{-rT^+}(u(\tilde{g}_{T^+}) - C(\tilde{g}_{T^+})) - \lambda_{T^+}(\bar{g} - \tilde{\delta}g_{T^+}).$$

Подставляя полученное выражение в равенство (6), после преобразований получим

$$u(g_T^-) - C(g_T^-) - \lambda_T e^{rT} \delta g_T^- + rF = u(g_T^+) - C(g_T^+) - \tilde{\delta} g_T^+. \quad (7)$$

Заметим, что $(u(g_T^-) - C(g_T^-) - \delta \lambda_T e^{rT} g_T^-)$ — излишек общества (учитывающий эффект истощения подземных вод) до инвестиций, а $(u(g_T^+) - C(g_T^+) - \tilde{\delta} g_T^+)$ — излишек общества после осуществления инвестиций в водосберегающую технологию. Полученное условие говорит о том, что инвестиции следует осуществлять в тот момент, когда результирующий выигрыш в излишке общества сбалансирован издержками внедрения водосберегающей технологии.

Согласно условиям дополняющей нежесткости (3), имеем

$$u'(x_T^-)g_T^- = (c_g + \delta \lambda_T e^{rT})g_T^-.$$

Из аналогичных условий для задачи (1) получим

$$u'(x_T^+)g_T^+ = (c_g + \tilde{\delta}\lambda_T e^{rT})g_T^+,$$

что после подстановки в (7) дает

$$u(g_T^-) - u'(g_T^-)g_T^- + c_g g_T^- - C(g_T^-) + rF = u(g_T^+) - u'(g_T^+)g_T^+ + c_g g_T^+ - C(g_T^+). \quad (8)$$

Поскольку функция полезности по условию вогнута и $u(0) = 0$, то $(u(g) - u'(g)g)$ возрастает по g . Кроме того,

$$(c_g g - C(g))'_g = c_g + c'_g g - c_g = c'_g g \geq 0,$$

откуда следует, что $(u(g) - u'(g)g + c_g g - C(g))$ возрастает по x . Это означает, что при положительных фиксированных издержках условие (8) выполняется лишь при $x_T^- < x_T^+$. В результате в момент T имеет место скачкообразный рост водопотребления и, соответственно, скачкообразное падение предельной полезности, как показано на рисунке. Глубина падения зависит от величины стоимости инвестиционного проекта F . В частности, при нулевых фиксированных издержках разрыв отсутствует вовсе, и мы наблюдаем лишь излом траектории.

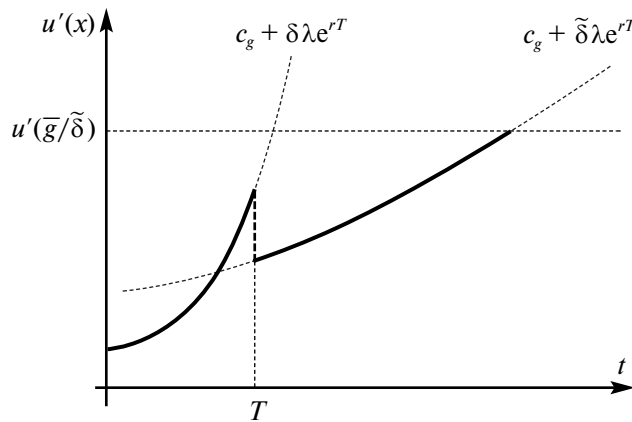


Рис. Скачкообразное падение предельной полезности водопотребления в момент инвестирования

Децентрализация

Если инвестиции осуществлять выгодно, причем оптимальным моментом для инвестирования является момент времени, отличный от нуля, то возникает проблема с децентрализацией эффективной траектории.

Проблема несуществования конкурентного равновесия в случае невыпуклости издержек (в силу наличия фиксированных затрат на инвестиционный проект) не нова. Эта проблема обсуждалась не только для статических, но и для динамических моделей с истощаемыми ресурсами. Применительно к моделям с истощаемыми ресурсами эта проблема изучалась в двух аспектах. Во-первых, рассматривалась проблема несуществования конкурентного равновесия в ресурсодобывающих отраслях с невыпуклыми функциями издержек (преимущественно с U -образными кривыми средних издержек). В частности, эта проблема рассматривалась в работах (Eswaran, Lewis, Heaps, 1983; Fisher, Karp, 1993).

Другая проблема возникает в случае существования необратимых издержек, связанных, к примеру, с освоением нового месторождения. В этом случае, как показали (Hartwick, Kemp, Long, 1986), рассматривая модель с однородными

месторождениями истощаемого ресурса, где использование каждого месторождения сопряжено с фиксированными расходами на его освоение, эффективная траектория требует последовательной разработки этих месторождений. Авторы построили пример с нулевыми издержками добычи и спросом с постоянной эластичностью, для которого показали, что децентрализация подобной траектории невозможна в условиях совершенной конкуренции. Фишер (Fischer, 1998) обобщила результат, содержащийся в работе (Hartwick, Kemp, Long, 1986) для отрасли с произвольной функцией полезности и постоянными предельными издержками, где эффективность требует последовательной разработки месторождений.

Однако в рассмотренных работах проблема состояла лишь в том, что у фирм нет стимулов разрабатывать ресурсы последовательно. В данном случае мы наблюдаем несколько иную ситуацию. Во-первых, речь идет об одном ресурсе. Во-вторых, в зависимости от специфики водосберегающей технологии ее внедрение в одних ситуациях может осуществляться потребителем ресурса, а в других, напротив, поставщиком.

Если речь идет о потребителе, то он не получает никаких прямых выгод от использования технологии, так как водосбережение приводит лишь к пополнению природного источника, которым управляет поставщик ресурса. В этом случае мы в дополнение к невыпуклости технологии сталкиваемся также с наличием внешнего эффекта, что лишь усугубляет проблему. В этой ситуации внедрение водосберегающей технологии (при сохранении эффективности траектории водопотребления) возможно лишь за счет предоставления целевой субсидии потребителю, причем для обеспечения эффективности момента внедрения технологии подобная субсидия должна предлагаться лишь в момент T . Тем не менее даже при внедрении подобной программы в оптимальный для общества момент времени остается другая проблема, связанная с поставщиком воды. Если поставщик будет оперировать в условиях скачкообразно падающих в момент T тарифов, то для того, чтобы у него не было стимула перераспределять объемы поставок воды от момента, следующего за T к моменту, предшествующему T , он должен быть заранее осведомлен о том, что скачкообразное падение тарифа в момент T будет компенсировано ростом запаса подземных вод в силу внедрения соответствующей технологии со стороны потребителя.

Обратимся к другой ситуации, когда водосберегающая технология внедряется производителем, т. е. агентом, который напрямую получает выгоду от внедрения этой технологии в виде увеличения потока возвратных вод, пополняющих подземные источники. В этом случае отсутствуют внешние эффекты, но тем не менее остается проблема, связанная с невыпуклостью функции издержек.

Попытаемся ответить на следующий вопрос. Если в этой ситуации водоснабжающая компания будет сталкиваться с семейством тарифов, полученных как решение задач (2) и (1) при фиксированных T и S_T , то выберет ли она эффективные значения для момента внедрения и остаточного запаса? Если выбранные T и S_T окажутся эффективными, то это означает, что соответствующая траектория водопотребления будет совпадать с эффективной и при этом фирма примет эффективное решение об инвестициях. В противном случае эффективная траектория будет недецентрализуема.

Итак, обозначим найденные из решения задач (2) и (1) тарифы через p , т. е. $p_t \equiv u'(g_T)$. Тогда задача водоснабжающей компании, из которой находим оптимальный с точки зрения компании момент для инвестирования, примет вид:

$$\begin{aligned} \max_{g, T \geq 0} \int_0^T (p_t g_t - C(g_t)) e^{-rt} dt + Fe^{-rT} + \Pi(T, S_T); \\ \dot{S}_t = \bar{g} - \delta g_t, \\ S_t \geq 0, S_0 \text{ — задано,} \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Pi(T, S_T)$ — максимальная прибыль, которую может получить компания после того, как были осуществлены инвестиции в водосберегающую технологию, т. е.

$$\begin{aligned} \Pi(T, S_T) = \max_{g, T \geq 0} \int_T^\infty (p_t g_t - C(g_t)) e^{-rt} dt; \\ \dot{S}_t = \bar{g} - \tilde{\delta} g_t, t \geq T; \\ S_t \geq 0, S_0 \text{ — задано.} \end{aligned} \quad (10)$$

Заметим, что в силу определения тарифов условия первого порядка и условие трансверсальности для задачи (10) совпадают с соответствующими условиями для задачи (2). Аналогично условия первого порядка задачи (9) совпадают с условиями первого порядка для задачи (1), однако условия трансверсальности несколько различаются. Условие трансверсальности по запасу ресурса в момент T примет вид

$$\mu = (\Pi(T, S_T) e^{-rT})'_{S_T},$$

где μ — теневая оценка запаса подземных вод в задаче (9), а условие для определения оптимального момента инвестирования для задачи (9) можно записать как

$$(p_T^- g_T^-) - C(g_T^-) e^{-rT} + \mu_T (\bar{g} - \delta g_T^-) + rF e^{-rT} = (p_T^+ g_T^+) - C(g_T^+) e^{-rT} + \mu_T (\bar{g} - \tilde{\delta} g_T^+),$$

что можно переписать в виде

$$p_T^- x_T^- - C(g_T^-) - \delta \mu_T e^{rT} g_T^- + rF = p_T^+ x_T^+ - C(g_T^+) - \tilde{\delta} \mu_T e^{rT} g_T^+. \quad (11)$$

Заметим, что разницу между выручкой и совокупными издержками фирмы (включающими как издержки добычи, так и рентную компоненту, отражающую истощение подземных вод) мы можем трактовать как выигрыш фирмы. Тогда в отличие от условия (7) фирма в качестве наилучшего момента для инвестирования выбирает тот, при котором ее выигрыш (а не выигрыш общества) сбалансирован издержками от внедрения водосберегающей технологии.

Поскольку в силу условий первого порядка с учетом введенного выше определения тарифов $p_T^- g_T^- = (c_g + \delta \mu_T e^{rT}) g_T^-$ и $p_T^+ g_T^+ = (c_g + \delta \mu_T e^{rT}) g_T^+$, то условие (11) влечет

$$c_g g_T^- - C(g_T^-) + rF = c_g g_T^+ - C(g_T^+). \quad (12)$$

Таким образом, (12) и (8) могут выполняться одновременно лишь в случае $u(g_T^-) - u'(g_T^-) g_T^- = u(g_T^+) - u'(g_T^+) g_T^+$. Однако в силу возрастания $(u(g) - u'(g)g)$ это возможно лишь в условиях непрерывности траектории водопотребления (т. е. при $g_T^- = g_T^+$, что несовместно с наличием фиксированных издержек F).

Государственное регулирование

Как следует из вышеприведенного анализа, фирмы и общество имеют разные стимулы для инвестирования в водосберегающую технологию. Это означает, что установления эффективных тарифов на воду недостаточно для достижения эф-

фективной траектории водопотребления. Предположим, что правительство субсидирует рассмотренные выше инвестиции в водосберегающую технологию и в результате расходы фирмы составят величину $(1 - \tau)F$, где τ — ставка субсидирования. Тогда условие (12) примет вид

$$c_g g_T^- - C(g_T^-) + r(1 - \tau)F = c_g g_T^+ - C(g_T^+). \quad (13)$$

Поскольку эффективная траектория должна удовлетворять условию (8), то ставку субсидирования нужно выбирать таким образом, чтобы

$$c_g g_T^- - C(g_T^-) + rF - (c_g g_T^+ - C(g_T^+)) = (u(g_T^+) - u'(g_T^+)g_T^+) - (u(g_T^-) - u'(g_T^-)g_T^-),$$

откуда с учетом (13) находим:

$$\tau = \frac{(u(g_T^+) - u'(g_T^+)g_T^+) - (u(g_T^-) - u'(g_T^-)g_T^-)}{rF}.$$

Поскольку $g_T^+ > g_T^-$, то в силу возрастания $(u(g) - u'(g)g)$ получим, что $\tau > 0$. Таким образом, децентрализация эффективного решения об инвестировании возможна лишь при субсидировании расходов на внедрение более совершенной технологии водопотребления. Заметим, что расходы на субсидию могут быть (по крайней мере, частично) возмещены за счет введения, к примеру, налога на прибыль с постоянной во времени ставкой, поскольку такой налог лишь пропорционально уменьшит прибыль, но при этом оставит в силе условия первого порядка.

Заключение

Мы рассмотрели модель оптимального управления заданным запасом подземных вод, где не вся забранная из природного источника вода утилизируется, а часть воды обратно возвращается в природный источник, дополнив ее возможностью реализации водосберегающего инвестиционного проекта, который сопряжен с большими фиксированными издержками. Рассмотренный проект позволяет снизить коэффициент безвозвратного водопотребления, увеличив тем самым возвратный поток вод, пополняющих природный источник.

Исследование параметров эффективной траектории показало, что до момента внедрения водосберегающей технологии водопотребление постепенно снижается в силу роста теневой оценки истощающегося запаса подземных вод. Однако в момент внедрения новой технологии происходит скачкообразное увеличение водопотребления. Далее оно снова падает вплоть до достижения стационарного состояния, в котором водозабор в точности равен объему пополнения природного источника.

Децентрализация полученной эффективной траектории оказывается невозможной в силу невыпуклости функции издержек, вызванной фиксированными издержками инвестиционного проекта. Одним из вариантов решения этой проблемы является субсидирование инвестиционных расходов при соответствующем выборе ставки субсидирования.

В работе рассмотрена ситуация с единственным возможным инвестиционным проектом. Однако данную модель можно обобщить, полагая, что издержки инвестиционного проекта являются функцией от коэффициента безвозвратного водопотребления, где более низкий уровень безвозвратного водопотребления сопряжен с более высокими расходами на внедрение соответствующей водосберегающей технологии.

Источники

Фридман А. А. Реформирование тарифной политики на услуги водоснабжения: сравнительный анализ // Экономический журнал ВШЭ. 2008. Т. 12. № 4. С. 471—487.

Chakravorty U., Hochman E., Zilberman D. A Spatial Model of Optimal Water Conveyance // Journal of Environmental Economics and Management. 1995. Vol. 29. N 1. P. 25—41.

Chakravorty U., Umetsu Ch. Basinwide Water Management: a Spatial Model // Journal of Environmental Economics and Management. 2003. Vol. 45. N 1. P. 1—23.

Dinar A., Zilberman D. The Economics of Resource-Conservation, Pollution-Reduction Technology Selection: The Case of Irrigation Water // Resources and Energy. 1991. Vol. 13. N 4. P. 323—348.

Eswaran M., Lewis T. R., Heaps T. On the Non-Existence of Market Equilibria in Exhaustible Resources with Decreasing Costs // Journal of Political Economy. 1983. Vol. 91. P. 154—167.

Fischer C. Once-and-for-All Costs and Exhaustible Resource Markets // Resources for the Future Discussion Paper. 1998. N 98/25.

Fisher A., Karp L. Nonconvexity, Efficiency and Equilibrium in Exhaustible Resource Depletion // Environmental Resource Economics. 1993. Vol. 3. P. 97—106.

Hadley G., Kemp M. C. Variational Methods in Economics. Amsterdam, 1971.

Hartwick J., Kemp M., Long N. Set-Up Costs and Theory of Exhaustible Resources. // Journal of Environmental Economics and Management. 1986. Vol. 13. P. 212—224.

Shiklomanov I. A. World Water Resources at the Beginning of the XXIst Century. Cambridge, 2003.