

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЛГОСРОЧНОЙ СТРАТЕГИИ ОСВОЕНИЯ КОСМОСА И СОХРАНЕНИЯ БИОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Гофман К. Г., Кречетов Л. И.

(Москва)

В предложенной вероятностной модели развития эколого-экономической системы, расходуемой лимитированный биосферный ресурс в производственных целях, предусматриваются затраты на разработку космической технологии, а также на охрану и частичное восстановление биосферы. Описываются траектории эволюции системы и указываются условия, допускающие своевременное создание космической технологии.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Сохранение биосферы Земли в условиях растущего антропогенного воздействия на экологические системы — одна из острейших глобальных проблем современности. Поиски стратегии ее решения ведутся прежде всего в направлении создания максимально щадящих биосферу «замкнутых» технологических процессов — малоотходных технологий, экологически «чистых» источников энергии и т. п. Важность этого направления несомненна. Вместе с тем очевидно, что возможности «щадящих» технологий велики, но все же принципиально ограничены: с их помощью удастся лишь оттянуть наступление момента, когда «ассимилирующие» способности биосферы окажутся исчерпанными. Принципиально неосуществима абсолютная материально-энергетическая замкнутость технологических процессов по отношению к окружающей среде. Полное прекращение сжигания органических топлив (немыслимое в обозримой перспективе) решило бы проблему сохранения газового состава атмосферы (утраты кислорода и перенасыщения углекислым газом). Однако нетрадиционные (не требующие сжигания органических топлив) источники энергии — солнце, ветер, морские приливы, глубинное тепло Земли — имеют свои «экологические» минусы (необходимость отторжения больших территорий, сохранение опасности локальных и глобальных термодинамических нарушений и т. д.). В конечном счете все мыслимые виды «экологизации» человеческой деятельности в пределах биосферной оболочки Земли сводятся лишь к перераспределению экологического «стресса» в пространстве и во времени, т. е. использованию лимитированных возможностей ассимиляционного потенциала биосферы — ее способности «противостоять» антропогенному давлению.

Есть все основания полагать, что долгосрочная (сверхдолгосрочная) гармонизация взаимоотношений общества и природы может иметь место лишь при условии перемещения в перспективе экологически наиболее вредных видов человеческой (прежде всего хозяйственной) деятельности за пределы биосферы — в космическое пространство. Такое «использование» космического пространства предсказывал К. Э. Циолковский.

Хозяйственное освоение космоса в принципе означало бы революционное расширение возможностей сохранения биосферы Земли. Ассимиляционный потенциал космического пространства в пределах столь же бесконечен, сколь и само это пространство, хотя и можно предвидеть появление в отдаленном будущем проблем, связанных с его охраной. Конечно же, сегодня крайне трудно оценить, когда и в какой мере «биосферозащитное» направление освоения космоса окажется критически важным для решения глобальных экологических проблем. Вполне ве-

роятно, что не сохранение биосферы, а другие общественные приоритеты будут определять стратегию космических исследований в обозримой перспективе. Однако, на наш взгляд, было бы непростительным легкомыслием исключать из альтернатив решения глобальной экологической проблемы перспективу спасения биосферы Земли путем перенесения хозяйственной деятельности в космос. Учет такой перспективы особенно актуален в условиях, когда возникает тенденция к снижению приоритетности космических исследований в общественном сознании, их противопоставлению другим социальным приоритетам, в том числе и задачам охраны окружающей среды.

В нашей стране ежегодные расходы на народнохозяйственный и научный космос, включая космическую систему многоразового использования «Буран», составляют 3 млрд. руб. [Рыжков Н. И. О программе предстоящей деятельности правительства СССР. Доклад на первой сессии Верховного Совета СССР//Правда. 1989. 8 июня], а на природоохранные мероприятия — около 11 млрд. руб. [1]. Уже сегодня эти затраты можно в значительной степени рассматривать как взаимодополняющие. При изучении природных ресурсов и окружающей среды для целей их охраны в нашей стране используются космическая метеорологическая система «Метеор-2», спутники типа «Метеор-природа», «Космос», научно-исследовательский комплекс «Мир». В контрольно-информационном аспекте природоохранная деятельность тесно увязана с космическими исследованиями и в перспективе такая связь будет, несомненно, развиваться и углубляться. Однако между этими видами деятельности вероятна и другая, более фундаментальная взаимосвязь, обусловленная возможностью превращения «космического хозяйствования» в решающий фактор снижения антропогенного давления на биосферу Земли. В этом случае закономерно возникает задача выбора стратегии распределения ресурсов между «традиционной» экологизацией «земного» хозяйства, способной, как было отмечено выше, лишь отдалить наступление глобальной экологической катастрофы, и подготовкой к «прорыву» хозяйственной деятельности в космос, за пределы биосферы, как кардинальному решению планетарных экологических проблем.

Исследование такой задачи сегодня можно проводить лишь в абстрактной постановке, но в дальнейшем можно надеяться и на получение определенных количественных оценок рационального, в аспекте минимизации вероятности глобального экологического кризиса, соотношения между затратами на освоение космоса и на непосредственную охрану ресурсов биосферы.

В наиболее общем виде исследуемая ситуация может быть описана следующим образом. Пусть имеется хозяйственная система, функционирующая за счет использования лимитированных ресурсов биосферы, далее именуемых биосферным (обобщенным) ресурсом. Конечный продукт системы расходуется на цели потребления, расширения производственного потенциала (накопления производственных фондов) и осуществления природоохранных мероприятий, позволяющих замедлить процесс истощения биосферного ресурса в результате хозяйственной деятельности. Кроме того, часть ресурсов (конечного продукта) системы может расходоваться на создание космических технологий, практически не требующих использования биосферного ресурса для хозяйственной деятельности. Переход на космические технологии требует длительных и крупномасштабных затрат. Предполагается, что известна кумулятивная величина таких затрат (фонда космических технологий), обеспечивающих их создание с высокой степенью вероятности. Известен, наконец, «критический» объем наличия биосферного ресурса, нарушение которого приводит к потере системой жизнеспособности (наступление экологической катастрофы).

Задача заключается в выявлении и анализе таких стратегий развития хозяйственной системы, при которых распределение ее ресурсов между потреблением, накоплением, природоохранной деятельностью и за-

тратами на космические технологии обеспечило бы монотонный рост (неубывание) потребления (условие социально безопасного развития) при поддержании наличия биосферного ресурса на экологически безопасном уровне. Оба требования должны выполняться на всем временном интервале до наступления момента хозяйственного «прорыва» в космос (перехода на космические технологии). После наступления этого момента социально и экологически безопасное развитие системы предполагается гарантированным.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Динамика хозяйственной системы моделируется с помощью производственной функции, зависящей помимо используемого количества биосферного ресурса R также и от накопленного объема производственных фондов K . Точнее, если $K(t)$ — накопленный к моменту t объем производственных фондов, то использование биосферного ресурса в момент t в количестве $R(t)$ позволяет получить продукцию в объеме $F(K(t), R(t))$, где F — скалярная производственная функция, зависящая от двух неотрицательных скалярных аргументов K и R . В своих построениях мы отправляемся от предложенной в [2] модели оптимального расходования лимитированного ресурса, включающей затраты на разработку новой технологии, позволяющей сократить потребление этого ресурса. В эту модель вводим затраты на охрану и восстановление биосферного ресурса, а также функцию его восстановления. Будем предполагать, как и в [3], что производственная функция положительно однородна первой степени. Удобно будет ввести замену переменных, рассматривая вместо переменной R переменную $y = R/K$. Переменная y представляет собой отношение расходуемого биосферного ресурса к наличным производственным фондам. В новых переменных производственную функцию можно записать в виде

$$F(K, R) = Kf(y), \quad (1)$$

где $f(y) = F(1, y)$. Будем предполагать, что функция удовлетворяет соотношениям

$$f(0) = 0, f'(0) = \infty, f' > 0, f'' < 0, \lim_{y \rightarrow \infty} f(y) < \infty. \quad (2)$$

Все используемые функции предполагаются дважды непрерывно дифференцируемыми.

Производимая продукция расходуется на нужды потребления, накопления, охраны (восстановления) биосферного ресурса и создания новой (космической) технологии. При затратах на охрану и восстановление биосферного ресурса в момент t , равных $n(t)$, он восстанавливается в объеме $r(n(t))$. В принятых выше переменных y , K расход биосферного ресурса $R(t) = K(t)y(t)$, поэтому динамика запаса биосферного ресурса S записывается уравнением

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= -Ky(t) + r(n(t)), \\ S(0) &= S_0, \end{aligned}$$

где S_0 — начальный запас биосферного ресурса*. Функция r удовлетворяет условиям $r' > 0$, $r'' < 0$, $r(0) = 0$.

Радикальным средством сбережения биосферного ресурса являются вложения в космическую технологию (КТ). В каждый момент времени t определенное количество средств $m(t)$ может отчисляться на разработку КТ, однако возможное ее создание в момент t зависит от общей суммы средств $z(t)$. Накопление фонда, необходимого для КТ, описы-

* Отсюда ясно, что моделируемая таким образом восстановимость биосферного ресурса не означает его неограниченности или неисчерпаемости. Впрочем, если функция восстановления r достаточно продуктивна либо начальный запас биосферного ресурса достаточно велик, а темпы его эксплуатации не слишком высоки, то на определенном временном интервале дефицитность ресурса может проявляться лишь в слабой степени и относиться преимущественно к перспективному его использованию.

вается выражением

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= g(m(t)), \\ z(0) &= 0, \end{aligned}$$

где функция g удовлетворяет условиям

$$g(0) = 0, \quad 0 < g' < \infty, \quad g'' < 0. \quad (3)$$

Таким образом, производимая в момент t продукция $F(R(t), K(t)) = KF(1, y(t))$ расходуется на потребление $c(t)$, вложения в охрану и восстановление биосферного ресурса $n(t)$, вложения в КТ $m(t)$; оставшаяся часть продукции идет на приращение производственных фондов K в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} \dot{K}(t) &= Kf(y(t)) - c(t) - n(t) - m(t), \\ K(0) &= K_0, \end{aligned}$$

где K_0 — начальный запас производственных фондов. Управляющими параметрами являются: $c(t)$ — потребление; $n(t)$ — затраты на охрану и восстановление биосферного ресурса; $m(t)$ — затраты на космическую технологию; $y(t) = R(t)/K(t)$ — управляющий параметр, характеризующий поток расходуемого биосферного ресурса относительно текущего размера производственных фондов.

Все переменные предполагаются неотрицательными. Выбор управляющих параметров осуществляется так, чтобы максимизировать суммарную дисконтированную полезность потребления; функцию полезности обозначим через $U(c)$ и будем считать, что она удовлетворяет условиям

$$U'(0) = +\infty, \quad U' > 0, \quad U'' < 0. \quad (4)$$

Предположим, что создание КТ зависит от накопленного фонда z вероятностным образом. Пусть ξ — случайная величина объема фонда КТ (ФКТ), при котором происходит ее создание. Будем считать, что задана функция распределения вероятностей случайной величины ξ , $\varphi(z) = P(\xi \leq z)$. Другими словами, $\varphi(z)$ — вероятность того, что новая технология будет разработана при объеме ФКТ, не превышающем z . По аналогии с [2] считается, что эффективность вложения в КТ первоначально незначительна, а затем возрастает. Требования на $\varphi(z)$ выражаются условиями

$$\varphi(0) = 0, \quad \varphi'(0) = 0, \quad \varphi' \geq 0, \quad \lim_{z \rightarrow \infty} \varphi(z) = 1. \quad (5)$$

Кроме того, предполагается, что при достаточно большом объеме ФКТ, скажем $\bar{z}$, создание КТ происходит немедленно с вероятностью единица. Это условие записывается как

$$\varphi(z) \begin{cases} < 1 & \text{для } 0 \leq z < \bar{z}, \\ = 1 & \text{для } \bar{z} \leq z. \end{cases} \quad (6)$$

Эволюция системы после создания КТ может протекать по-разному, в зависимости от масштабов применения КТ с соответствующим уменьшением, а затем и практически полным прекращением эксплуатации биосферного ресурса. Этот процесс можно описать с помощью модели, содержащей две конкурирующие технологии производства одного и того же вида продукции (или взаимозаменяемых видов продукции). Однако подробное рассмотрение процессов, идущих после разработки КТ, значительно усложнило бы анализ, не обещая существенно более точного качественного описания процессов, происходящих в период, предшествующий созданию КТ, что является основной целью данной работы. По этой причине процессы после момента t^* здесь представлены в упрощенном, агрегированном виде. Влияние этих процессов моделируется потоком полезности, возникающим после t^* . Пренебрегая эффектами переходного периода внедрения КТ, будем считать этот поток по-

лезности постоянным; обозначим его через δW , где δ — норма дисконтирования, а W — константа. Момент создания КТ является случайным, поэтому и суммарная дисконтированная полезность оказывается случайной величиной. Поскольку до момента t^* реализации новой технологии поток полезности выражается величиной $U(c(t))$, а после t^* поток полезности равен δW , то при условии, что создание КТ произойдет в интервале $(t, t+dt)$, суммарная дисконтированная полезность равна

$$\int_0^t e^{-\delta s} U(c(s)) ds + \int_t^\infty e^{-\delta s} \delta W ds. \quad (7)$$

После несложных преобразований (см. [2]) получим математическое ожидание суммарной дисконтированной полезности в виде

$$\int_0^\infty e^{-\delta t} [U(c)(1 - \varphi(z)) + W\varphi'(z)g(m)] dt. \quad (8)$$

Эта величина принимается в качестве критерия, который должен быть максимизирован при наличии ограничений, о которых шла речь выше

$$\dot{K} = Kf(y) - c - m - n, \quad K(0) = K_0, \quad (9)$$

$$\dot{S} = -Ky + r(n), \quad S(0) = S_0, \quad (10)$$

$$S(t) \geq \bar{S}, \quad (11)$$

$$\dot{z} = g(m), \quad z(0) = 0. \quad (12)$$

Все переменные, как управляющие c, m, n, y , так и фазовые K, S, z , неотрицательны. Величины $K_0, S_0, \bar{S}$ предполагаются неотрицательными; $\bar{S}$ задает критическое значение запаса биосферного ресурса, ниже которого система теряет жизнеспособность. Величина $\bar{S}$ определяется из соображений, внешних по отношению к описанной модели. Заметим, что неотрицательность переменных S, z следует из предложений модели.

Задача (8)–(12) является обобщением модели, рассмотренной в [3], поскольку содержит дополнительный управляющий параметр n — вложения в охрану и восстановление биосферного ресурса. Это расширение модели позволяет применить ее к исследованию взаимосвязи затрат на охрану природных ресурсов и создание КТ.

3. УСЛОВИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Модель (8)–(12) может рассматриваться как задача оптимального управления. Ее гамильтониан имеет вид

$$H = U(c)(1 - \varphi(z)) + \varphi'(z)g(m)W + \\ + \lambda(Kf(y) - c - m - n) - \mu(Ky - r(n)) + \gamma \dot{g}(m).$$

Ограничение (11) не вошло в гамильтониан, так как нас интересует поведение модели на интервале ее жизнеспособности, т. е. при $S > \bar{S}$. Поскольку функции считаются гладкими по переменным состояния и управления, выпишем необходимые условия оптимальности в дифференциальной форме без условий трансверсальности, которые нам не пригодятся

$$U'(c)(1 - \varphi(z)) - \lambda \leq 0 \text{ с равенством в случае } c > 0, \quad (13)$$

$$\varphi'(z)g'(m)W - \lambda + \gamma g'(m) \leq 0 \text{ с равенством в случае } m > 0, \quad (14)$$

$$\lambda Kf'(y) - \mu K \leq 0 \text{ с равенством в случае } y > 0, \quad (15)$$

$$-\lambda + \mu r'(n) \leq 0 \text{ с равенством в случае } n > 0; \quad (16)$$

сопряженная система имеет вид

$$\dot{\lambda} = \delta\lambda - \lambda f'(y) + \mu y, \quad (17)$$

$$\dot{\mu} = \delta\mu, \quad (18)$$

$$\dot{\gamma} = \delta\gamma + U(c) \varphi'(z) - \varphi''(z) g(m) W. \quad (19)$$

Здесь λ — текущая оценка производственных фондов; μ — текущая оценка запаса биосферного ресурса, а γ — текущая оценка ФКТ.

Из условий, наложенных на функции U и f , следует [3], что переменные потребления c и производственных фондов K не могут обращаться в нуль ни в одной точке интервала $[0, \infty]$. Поэтому (13), (15) сводятся к

$$U'(c) (1 - \varphi(z)) = \lambda, \quad (20)$$

$$\lambda f'(y) = \mu. \quad (21)$$

Из (13) — (19) нетрудно вывести следующие соотношения [3]

$$\dot{y} = f'(y) \frac{f(y) - yf'(y)}{f''(y)}, \quad (22)$$

$$-\frac{g''}{g'} \dot{m} = f(y) - yf'(y) - \frac{\delta W - U(c)}{U'(c)} g'(m) h(z), \quad (23)$$

$$-\frac{U''}{U'} \dot{c} = f(y) - yf'(y) - \delta - g(m) h(z), \quad (24)$$

где $h(z) = \varphi'(z) (1 - \varphi(z))^{-1}$. Величина $h(z) dz$ представляет собой (с точностью до величины порядка $(dz)^2$) условную вероятность создания КТ за счет увеличения ФКТ с z до $z + dz$, если меньшее значение фонда не приводит к созданию КТ.

4. О СРАВНИТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ c И ЗАТРАТ m НА КТ

В [2] описаны возможные виды траекторий оптимального потребления c и вложений в новую технологию m . В общем виде кривая потребления c состоит из двух участков — возрастания и последующего убывания — и имеет один максимум. Такой же общий вид имеет и кривая вложений m в КТ, однако в отличие от потребления m иногда начинаются не сразу. Исходные участки этих кривых могут отсутствовать, однако нас интересует динамика системы с того более раннего периода, когда потребление и вложения в КТ еще возрастают. Условия взаимного расположения кривых c и m исследованы в [2]. Поведение функции потребления описывает предположение 1 из [2], доказательство которого для нашей модели полностью сохраняется.

Пусть выполняются неравенства $h(z) > 0$, $f - yf' > \delta$. Тогда $h(z) > 0$ равносильно условию $\varphi'(z) > 0$, которое показывает, что ФКТ уже достаточно велик (чтобы стать эффективным), но еще не настолько, чтобы гарантировать с вероятностью единица создание КТ. Чтобы понять $f - yf' > \delta$, выясним смысл выражения $f - yf'$. По определению (1), $f(y) = F(1, R/K)$. Поэтому в силу однородности производственной функции F имеем $f'(y) = F_2'(1, R/K) = F_2'(K, R)$, где F_2' означает производную функции $F(K, R)$ по второму аргументу. Таким образом

$$f - yf' = \frac{1}{K} (F(K, R) - RF_2'(K, R)). \quad (25)$$

Если $F_2'(K, R)$ понимать как предельную оценку эффективности производственного использования биосферного ресурса, то $RF_2'(K, R)$ является ценностью затрачиваемого ресурса, разность $F(K, R) - RF_2'(K, R)$ будет приростом продукции за вычетом ценности затраченного биосферного ресурса, а выражение (25) представляет собой предельную отдачу от капитала. Следовательно, неравенство $f - yf' > \delta$ означает, что предельная отдача от капитала превосходит по величине норму дисконта δ . Заметим, что $f - yf'$ убывает, так как y , согласно (22), убывает,

а $f(y) - yf'(y)$, как нетрудно проверить, — возрастающая функция от y при условиях (2). Из предложения 1в, 1с из [2] следует, что неравенство $f - yf' > \delta$ выполняется на всем участке возрастания потребления и, возможно, на некотором последующем участке его убывания.

Ограничимся в оставшейся части этого раздела случаем $g(m) \equiv m$, фактически не теряющим в общности, зато позволяющим значительно упростить формулы. Из предложения 1с из [2] следует, что, если

$$m(t) < \left. \frac{f - yf' - \delta}{h(z)} \right|_t, \quad (26)$$

(это означает, что $m(t) < m^0(t)$, где $m^0(t)$ — из предложения 1с из [2]), то $\dot{c}(t) > 0$ и, наоборот, если в (26) неравенство меняет знак, то $\dot{c}(t) < 0$. Наконец, если в (26) — равенство, то $\dot{c}(t) = 0$.

Из (23) при фиксированных функциях y и z можно получить соотношение между c и m , которое выполняется, когда $\dot{m} > 0$

$$\frac{f - yf'}{h(z)} > \frac{\delta W - U(c)}{U'(c)}. \quad (27)$$

Преобразуя (26) и (27), запишем их в виде

$$\frac{f - yf'}{h(z)} > m + \frac{\delta}{h(z)}, \quad (28)$$

$$\frac{f - yf'}{h(z)} > \frac{\delta W - U(c)}{U'(c)}. \quad (29)$$

Рассмотрим случай, когда правая часть (28) больше правой части (29)

$$\frac{\delta W - U(c)}{U'(c)} < m + \frac{\delta}{h(z)}. \quad (30)$$

Воспользовавшись разложением в ряд Тейлора функции U в окрестности точки c , получим

$$\delta W < U\left(c + m + \frac{\delta}{h(z)}\right) - U''(\bar{c})\left(m + \frac{\delta}{h(z)}\right)^2, \quad (31)$$

где $c \leq \bar{c} \leq c + m + \delta/h(z)$. Величина δW — это будущий поток полезности, который установится после создания космической технологии, а

$$U\left(c + m + \frac{\delta}{h(z)}\right) \quad (32)$$

поток полезности текущего оптимального потребления c с добавлением вложений в космическую технологию, m , и члена $\delta/h(z)$, отражающего совокупное влияние дисконта и вероятности создания космической технологии при данном уровне ФКТ z .

Предложение 1. Если поток полезности текущего оптимального потребления c с учетом вложений в КТ нормы дисконтирования и вероятностных факторов устойчиво превышает поток полезности, возникающий после создания КТ,

$$\delta W < U\left(c + m + \frac{\delta}{h(z)}\right), \quad (33)$$

то потребление c достигает максимального значения еще в тот момент, когда поток вложений в космическую технологию будет нарастать.

Доказательство. Если соотношение (33) является устойчивым, т. е. сохраняется достаточно длительное время, то в силу предположения $U'' < 0$ устойчиво выполняется условие (31) и, следовательно, (30). Тогда равенство в (28) наступит раньше, чем в (29). Это будет означать, что потребление c раньше достигнет максимума, чем вложения m в КТ.

Таким образом, предложение 1 соответствует ситуации, когда система окажется перед дилеммой спада потребления или экологической ка-

тастрофы, поскольку вложения в КТ не обеспечили ее своевременного создания. Противоположная ситуация описывается в следующем предложении.

Предложение 2. Если устойчиво выполняется соотношение

$$\delta W > U\left(c + m + \frac{\delta}{h(z)}\right) - U''(c) \left(m + \frac{\delta}{h(z)}\right)^2, \quad (34)$$

связывающее будущий поток полезности после открытия КТ, δW , и текущий скорректированный поток полезности $U(c + m + \delta/h(z))$, то вложения m в КТ раньше, чем потребление, достигают максимума.

Доказательство. Достаточно заметить, что $U''(c) \geq U''(\bar{c})$, и воспользоваться разложением Тейлора функции полезности. Тогда будет устойчиво выполняться неравенство, обратное (30), и неравенство (29) раньше превратится в равенство, чем (28). Это будет означать, что поток вложений m в КТ достигнет максимума раньше, чем поток потребления c .

По предложению 2 система может развиваться, создавая достаточный ФКТ и сохраняя при этом рост потребления.

Заметим, что условия (33) и (34) сформулированы в исходных терминах модели и не содержат двойственных оценок.

5. СВЯЗЬ МЕЖДУ ВЛОЖЕНИЯМИ m В КТ И ЗАТРАТАМИ n НА ОХРАНУ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ БИОСФЕРНОГО РЕСУРСА

Из (15), (16) следует соотношение

$$f'(y)r'(n) \leq 1, \quad (35)$$

которое переходит в равенство, если вложения в охрану и восстановление биосферного ресурса n строго положительны. Учитывая полученное ранее соотношение $f'(y) = F'_2(K, R)$, заметим, что в левой части (35) стоит произведение предельной эффективности использования биосферного ресурса $F'_2(K, R)$ на предельную эффективность восстановления биосферного ресурса $r'(n)$. Восстановление биосферного ресурса осуществляется лишь в том случае, когда эти величины обратно пропорциональны. Другими словами, чем больше эффективность использования биосферного ресурса, тем больше нужно тратить вложений на его восстановление и охрану при снижающейся эффективности этих вложений (сбережение ресурса на единицу затрат).

Как показывает соотношение (22) и условие (2), величина $f'(y)$ растет, поэтому вложения в охрану и восстановление биосферного ресурса начинаются в момент, когда впервые выполняется равенство $f'(y) = 1/r'(0)$. Учитывая, что $f'(y) = F'_2(K, R)$, это условие записывается в исходных терминах задачи так

$$F'_2(K, R) = \frac{1}{r'(0)}. \quad (36)$$

Из (36) следует, что если $r'(0) = +\infty$, то вложения в охрану и восстановление биосферного ресурса начинаются сразу же, с момента $t=0$.

Условие (36) означает, что вложения в охрану и восстановление биосферного ресурса начинаются тогда, когда предельная оценка эффективности использования биосферного ресурса, $F'_2(K, R)$, растущая во времени, согласно $f'(y) > 0$, возросла настолько, что сравнялась с величиной, обратной пропорциональной предельной эффективности вложений в охрану и восстановление биосферного ресурса.

Опишем теперь условие, при котором начинаются вложения в создание космической технологии. Из (14) следует, что вложения начинаются тогда, когда впервые выполнится равенство

$$\gamma g'(0) = \lambda. \quad (37)$$

Из (19) при $m=0$ следует, что $\gamma = \gamma_0 e^{\delta t}$, где γ_0 — константа, имеющая смысл оценки ФКТ в нулевой момент времени. Точно так же из

(18) вытекает

$$\mu = \mu_0 e^{\delta t}, \quad (38)$$

где μ_0 — константа, имеющая смысл оценки биосферного ресурса в начальный момент времени. Учитывая, что $\lambda = f'(y)\mu$, и используя выражения для γ и λ , получим условие для начала вложений в космическую технологию

$$\gamma_0 g'(0) = \mu_0 / f'(y)$$

или

$$F'_2(K, R) = \frac{\mu_0}{\gamma_0} \frac{1}{g'(0)}. \quad (39)$$

Это условие удобно рассмотреть в случае $g(m) \equiv m$. Тогда оно показывает, что вложения в КТ начинаются в момент, когда эффективность использования биосферного ресурса возрастает до уровня, определяемого отношением начальной оценки биосферного ресурса к начальной оценке ФКТ.

Если $r'(0) > (\gamma_0/\mu_0)g'(0)$, то вложения в охрану и восстановление биосферного ресурса начнутся раньше, чем в создание КТ. В этом случае из (39) можно исключить $F'_2(K, R)$, воспользовавшись равенством в (35), и условие начала вложений в КТ примет вид

$$r'(n) = \frac{\gamma_0}{\mu_0} g'(0). \quad (40)$$

Поскольку $f'(y)$ возрастает, из (35) следует, что $r'(n)$ убывает. Согласно условию падения эффективности восстановления биосферного ресурса с ростом вложений, $r'' < 0$, это означает, что вложения n , раз начавшись, продолжают непрерывно возрастать. Равенство (40) в таком случае показывает, что вложения m в КТ начинаются в момент, когда эффективность вложений в охрану и восстановление биосферного ресурса n , измеряемая величиной $r'(n)$, уже упадет достаточно низко, а именно до уровня $(\gamma_0/\mu_0)g'(0)$. В случае $g(m) \equiv m$ этот уровень равен γ_0/μ_0 , т. е. задается отношением оценки ФКТ к оценке биосферного ресурса в нулевые моменты времени. Если, в частности, оценка биосферного ресурса μ_0 велика, то отношение γ_0/μ_0 мало, и вложения в КТ начнутся позже при прочих равных условиях.

Рассмотрим теперь промежуток времени, на котором осуществляют вложения как в охрану и восстановление биосферного ресурса (n), так и в КТ (m). Как следует из (36) и (38), на этом промежутке выполняется неравенство

$$F'_2(K, R) \geq \max \left(\frac{1}{r'(0)}, \frac{\mu_0}{\gamma_0} \frac{1}{g'(0)} \right),$$

т. е. предельная эффективность использования биосферного ресурса превышает оба порога, обозначающие моменты начала вложений в охрану и восстановление биосферного ресурса и в КТ. Рассмотрим случай $g(m) \equiv m$. Из (14), (16), (19), (38) с помощью несложных преобразований можно получить соотношение

$$\mu r'(n) = \gamma_0 - \int_0^t (\delta W - U(c)) \Phi'(z) e^{-\delta t} dt. \quad (41)$$

Оно связывает три переменные: n , c и m , где последняя присутствует в $\Phi'(z)$. Отметим, что в силу (40) и убывания $r'(n)$, разность $\delta W - U(c)$ положительна, т. е. превышение потока полезности при КТ над текущим потоком полезности является условием совместного осуществления вложений в биосферу и КТ. Дифференцируя (41) по t и вводя μ вместо μ_0 , получим

$$-\mu r'(n) = (\delta W - U(c)) \Phi'(z). \quad (42)$$

Стоящая в левой части (42) величина положительна и представляет собой падение эффективности восстановления биосферы, измеренное

в ее оценке μ . Уравнение (42), в частности, показывает, что если крутизна этого падения возрастает, то сохранение роста потребления допустимо лишь при росте эффективности вложений в КТ, $\varphi'(z)$, т. е. это возможно лишь на начальном участке вложений в КТ; наоборот, если эффективность вложений в КТ падает, что характерно для более позднего их периода, то прогрессирующее ухудшение восстановимости биосферы заставляет снижать потребление.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучены проблемы развития эколого-экономической системы, связанные с сохранением и восстановлением биосферы, подвергающейся истощению в результате антропогенной деятельности. В качестве взаимодополняющих стратегий поддержания потенциала биосферы рассмотрены стратегии затрат на охрану и восстановление биосферного ресурса и на создание космической технологии, позволяющей снизить нагрузку на биосферу. Создание КТ понимается как случайное событие, вероятность которого зависит от накопленной величины затрат на эту технологию. Исследование проводится в рамках модели оптимального управления, в которой производимый продукт в каждый момент времени распределяется между потреблением, затратами на охрану и восстановление биосферного ресурса, затратами на создание КТ и на приращение производственных фондов. Установлен вид оптимальных траекторий и зависимость между ними в динамике. Получены условия, при которых: 1) система может развиваться, не снижая потребления КТ; 2) развитие системы приводит к падению потребления или экологической катастрофе еще до того, как будут произведены затраты, необходимые для создания КТ.

Выведены условия начала вложений в КТ и вложений в охрану и восстановление биосферного ресурса, а также уравнение, связывающее рост вложений в КТ и в охрану и восстановление биосферы на том временном участке, где обе эти величины отличны от нуля.

Отметим основные выводы, которые можно сделать в результате анализа рассмотренной модели.

1. Когда масштабы роста экономической системы лимитируются наличием исчерпаемых (планетарных) ресурсов биосферы, существует взаимосвязь между затратами на их охрану и расходами, обеспечивающими возможность перехода к технологиям, не требующим использования биосферного ресурса, — космическим. Иначе говоря, затраты на освоение космоса могут рассматриваться как обеспечивающие сохранение ресурсов биосферы Земли. Анализ (41) показывает, что отказ от вложений в КТ, равносильный в терминах модели предположению о невысокой эффективности затрат на эту технологию ($\varphi'(z)$ мало), привел бы при сохранении роста потребления к быстрому возрастанию вложений в охрану и восстановление биосферного ресурса при одновременном падении их эффективности в смысле восстановления ресурса, $r'(n)$. Поэтому наиболее рациональной является стратегия взаимосвязанных вложений как в охрану и восстановление биосферы, так и в создание КТ.

2. Распределение капитальных вложений между сферой охраны природы (в природоохранные мероприятия, малоотходные технологии и т. п.) и между космическими исследованиями в условиях, когда необходимо обеспечить устойчивую (не допускающую спада потребления) траекторию экономического роста при сохранении жизнеспособности биосферы, подчиняется определенным закономерностям. В рамках рассматриваемой модели можно отметить следующую зависимость: сохранение роста потребления при прогрессирующем падении эффективности вложений в сбережение биосферы возможно лишь при обеспечении роста эффективности вложений в КТ.

3. Вложения в КТ начинаются, когда эффективность сохранения биосферного ресурса опускается ниже определенного уровня (40). В те-

чение некоторого последующего периода эти вложения нарастают, но одновременно растет дефицитность биосферного ресурса.

Если разработка КТ затягивается, то в конце концов необходимость поддержания уровня потребления в условиях обостряющегося дефицита биосферного ресурса заставит перейти к снижению затрат на КТ, возможно, еще не обеспечив высокой вероятности ее создания. Тем более промедление с затратами на КТ в условиях усиливающейся дефицитности биосферного ресурса прямо ведет к ситуации, когда система окажется уже неспособной выделить достаточные средства на КТ и, тем самым, будет обречена на почти неминуемую экологическую деградацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реформа экономики: темпы и резервы. Социально-экономическое развитие СССР в 1988 году//Известия. 1989. 21 янв.
2. *Kamien M. I., Schwartz N. L.* Optimal Exhaustible Resource Depletion with Endogenous Technical Change//Rev. Econ. Stud. 1978. V. XLV (I). № 139.

Поступила в редакцию
30 V 1989