Дементьева М.Б., Павлова Ю.Н.
Санкт-Петербургский государственный университет

Теоретико-игровой подход к моделированию механизмов Киотского протокола[1]

Разработанный с целью контроля выбросов Киотский протокол стал первым документом, который использует экономические меры для решения важных экологических проблем. В этой статье рассматриваются модели механизмов, заложенных в Киотский протокол. В частности, строится кооперативная игра n игроков. Характеристическая функция вводится как разность между общими затратами игроков в случае независимых действий и в случае кооперативного поведения.

Рассмотрим игру с участием двух сторон — развитой страны (игрок 1) и страны с переходной экономикой (игрок 2). За отчетный период страны должны понизить уровень выбросов парниковых газов на определенную договором величину ΔE_i, $i = 1, 2$. В конце периода можно учитывать также квоты на эмиссию K_i ($K_1 = 0$, $K_2 > 0$). Пусть c_i — цена единицы снижения выбросов, $i = 1, 2$, $c_1 > c_2$.

Построим двухшаговую модель, включающую механизмы "совместного осуществления" и "торговли квотами". На первом шаге страна 1 дает целевой кредит стране 2 на снижение уровня выбросов в размере M_1^*, тогда затраты сторон договора равны

$$H_1' = M_1^*,$$

$$H_2' = c_2 \cdot \Delta E_2 - M_1^*.$$

На втором шаге страна 2 отдает долг единицами понижения уровня выбросов (в частности, это могут быть и квоты). Затраты сторон равны

$$H_1'' = 0,$$

$$H_2'' = c_2(\Delta E_1 - \Delta K_2) - I,$$

[1]Более подробное описание гибких механизмов можно найти, например, в Интернете на сайте http:\\www.wwf.ru

Величина I обозначает возможный прирост страны 2 за рассматриваемый период времени (на полученные от страны 1 средства страна 2 реализует проект "совместного осуществления", который стимулирует развитие промышленной отрасли, что ведет к увеличению производительности, а это, в свою очередь, повышает прибыль, $I \geq 0$). Величина ΔK_2 выбирается таким образом, чтобы $H_2' + H_2'' \geq 0$, т.е. страна 2 не может получить чистую прибыль от продажи. Это естественное ограничение также вводится из соображений экономии квоты на выбросы для будущего экономического развития страны 2. Очевидно, что затраты игроков в данном случае меньше, чем если бы каждая страна добивалась снижения самостоятельно.

Теперь построим кооперативную модель для n стран, участвующих в проекте "совместного осуществления", включающем "торговлю квотами". Совместные действия развитых стран и стран с переходным типом экономики приводят к снижению общих затрат в борьбе за уменьшение уровня выбросов парниковых газов.

В качестве характеристической функции возьмем разность между суммарными затратами игроков в случае, когда они не прибегают к кооперации, и затратами, когда игроки действуют согласованно. Будем считать, что все стороны имеют квоты на выбросы $K_i \geq 0$, $i \in N$, N — группа стран, подписавших договор о совместных действиях.

Для одиночных игроков $i \in N$ значение характеристической функции $v(\{i\}) = 0$. Рассмотрим значение характеристической функции v для коалиции $\{i, j, l\}$ трех стран. Суммарные затраты игроков вне кооперации равны

$$H_i^0 + H_j^0 + H_l^0 = c_i(\Delta E_i - \Delta K_i) + c_j(\Delta E_j - \Delta K_j) + c_l(\Delta E_l - \Delta K_l),$$

причем $c_i > c_j > c_l$, $K_i < K_j < K_l$, $0 \leq \Delta K_i < K_i$, $0 \leq \Delta K_j < K_j$, $0 \leq \Delta K_l < K_l$.

При совместных действиях возможны два варианта:

1. $\Delta E_i - \Delta K_i \geq \Delta K_l$ Тогда игрок i делает две закупки: $Q_1 =$

ΔK_l и $Q_2 = \min\{\Delta K_j; \Delta E_i - \Delta K_i - \Delta K_l\}$, Затраты игроков

$$\begin{aligned}
&H_i = c_i(\Delta E_i - \Delta K_i - \Delta K_1 - Q_2) + s_1 Q_1 + s_2 Q_2,\\
&H_j = c_j(\Delta E_j - \Delta K_j + Q_2) - s_2 Q_2,\\
&H_l = c_l(\Delta E_l - \Delta K_l + Q_1) - s_1 Q_1 = c_l \Delta E_l - s_1 Q_1,\\
&H_i + H_j + H_l =\\
&\quad = c_i(\Delta E_i - \Delta K_i - Q_1 - Q_2) + c_j(\Delta E_j - \Delta K_j + Q_2) + c_l \Delta E_l.
\end{aligned}$$

Значение характеристической функции $v(\{i,j,l\})$ равно

$$\begin{aligned}
v(\{i,j,l\}) &= H_i^0 + H_j^0 + H_l^0 - H_i - H_j - H_l =\\
&= c_i(Q_1 + Q_2) - c_j Q_2 - c_l Q_1 =\\
&= Q_1(c_i - c_l) + Q_2(c_i - c_j).
\end{aligned}$$

2. $\Delta E_i - \Delta K_i < \Delta K_l$, Во этом случае игрок i делает покупку Q_1, игрок j покупку Q_2 у игрока l: $Q_1 = \Delta E_i - Q_i$, $Q_2 = \min\{Q_j; Q_l - \Delta E_i + Q_i\}$, тогда

$$\begin{aligned}
&H_i = c_i(\Delta E_i - \Delta K_i - Q_1) + s_1 Q_1 = s_1 Q_1,\\
&H_j = c_j(\Delta E_j - \Delta K_j - Q_2) + s_2 Q_2,\\
&H_l = c_l(\Delta E_l - \Delta K_l + Q_1 + Q_2) - s_1 Q_1 - s_2 Q_2,\\
&H_i + H_j + H_l =\\
&\quad = c_j(\Delta E_j - \Delta K_j - Q_2) + c_l(\Delta E_l - \Delta K_l + Q_1 + Q_2).
\end{aligned}$$

Значение характеристической функции $v(\{i,j,l\})$ равно

$$\begin{aligned}
v(\{i,j,l\}) &= c_i(\Delta E_i - \Delta K_i) + c_j Q_2 - c_l(Q_1 + Q_2) =\\
&= Q_1(c_i - c_l) + Q_2(c_j - c_l).
\end{aligned}$$

Итак, мы можем записать общую формулу для характеристической функции коалиции трех стран

$$v(\{i,j,l\}) = \begin{cases} Q_1(c_i - c_l) + Q_2(c_i - c_j), & \text{при } \Delta E_i - \Delta K_i \geq \Delta K_l;\\ Q_1(c_i - c_l) + Q_2(c_j - c_l), & \text{при } \Delta E_i - \Delta K_i < \Delta K_l. \end{cases}$$

Здесь

$$Q_1 = \min\{\Delta K_l, \Delta E_i - \Delta K_i\},$$

$$Q_2 = \min\{\Delta K_j; |\Delta K_l - \Delta E_i + \Delta K_i|\}.$$

Аналогичным образом вычисляются значения характеристической функции для коалиций с бо́льшим количеством игроков, причем такая игра является супераддитивной.

Учитывая возможную прибыль от вложений, связанную с развитием производства в странах со слабой экономикой, можно рассмотреть динамическую модель Киотского протокола для двух игроков. На первом этапе страна 1 вкладывает M_1^*:

$$H_1(1) = M_1^*(1),$$

$$H_2(1) = c_2(1) \cdot \Delta E_2(1) - M_1^*(1).$$

На втором этапе

$$H_1(2) = -(1-\alpha)I(1) + M_1^*(2),$$

$$H_2(2) = c_2(2)(\Delta E_1(1) - \Delta K_2(2)) - \alpha I(1) - M_1^*(2), i := 0, \dots, T.$$

В момент времени r затраты игроков равны

$$H_1(r) = -(1-\alpha)I(r-1) + M_1^*(r),$$

$$H_2(r) = c_2(r)(\Delta E_1(r-1) - \Delta K_2(r)) - \alpha I(r-1) - M_1^*(r), i := 0, \dots, T.$$

Величина $I(r)$ обозначает дополнительный доход в стране 2 в момент $r+1$ от вложений в момент r. Параметр α характеризует распределение прибыли между игроками.

Заключение. Киотский протокол предполагает использование экономических методов для решения экологических проблем. Для снижения затрат на ограничение выбросов используются гибкие механизмы, позволяющие добиваться необходимой редукции выбросов посредством кооперации. В этой статье мы рассмотрели некоторые модели реализации гибких механизмов Киотского протокола для совместного снижения выбросов парниковых газов. В частности, построена динамическая модель, учитывающая возможную дополнительную прибыль от развития производства. При дальнейшем анализе данных моделей будут рассмотрены численные данные о реальных странах, их экономическом развитии, базовых уровнях выбросов и другие параметры.