

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ МЕЖДУНАРОДНОЙ КООРДИНАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К. В. АНАНИЧЕВ, М. А. БЕРМАНТ, А. Ю. ШЕВЯКОВ

(Москва)

В последние годы осуществление международного научно-технического сотрудничества превратилось в самостоятельную государственную функцию многих стран, высокоразвитых и развивающихся.

Одним из наиболее важных каналов международного сотрудничества в области науки и техники являются международные научно-технические и экономические организации, в которых это сотрудничество осуществляется на многосторонней основе. Многостороннее сотрудничество вообще и особенно стран с различным социально-политическим строем представляет собой весьма сложный процесс. С одной стороны, сотрудничество в области науки и техники объективно необходимо, с другой, — применение конкретных результатов сотрудничества существенно осложняется из-за различия в производственных отношениях и в формах собственности одних стран по сравнению с другими. Это противоречие международного сотрудничества проявляется тем сильнее, чем больше результаты сотрудничества носят прикладной и коммерческий характер. Если двустороннее сотрудничество, как правило, паритетно, взаимовыгодно и в известной степени конфиденциально, то в многостороннем сотрудничестве эти характеристики носят более сложный характер.

В международных организациях как инструменте многостороннего сотрудничества присутствует указанное выше противоречие участия различных сторон. Исключение составляют лишь международные организации социалистических стран, для которых многостороннее сотрудничество в области науки и техники является способом достижения целей социалистической интеграции. Что касается капиталистических и некоторых развивающихся стран, идущих по капиталистическому пути, то многостороннее сотрудничество их в области науки и техники всегда противоречиво по своей природе. Но, несмотря на это, капиталистические страны идут на многостороннее сотрудничество, ограничивая его рамки областями научно-технической информации, фундаментальных и «полуфундаментальных» научных исследований, крупных научных проблем, которые или не под силу решить одной стране, или они не представляют непосредственного коммерческого интереса.

В последние годы международные научно-технические организации начинают играть все более заметную роль в мировом научно-техническом прогрессе, все более становясь институтом международной кооперации и международного разделения труда в области науки и техники. Их основные функции: сбор, распространение и обмен информацией в различных отраслях экономики, науки и техники; деятельность, направленная на развитие и внедрение международных стандартов, повышение качества технологии и изделий, прогнозирование развития различных отраслей экономики, науки, техники, и социального развития, осуществление координации научных исследований фундаментального и полуфундаменталь-

ного характера. Наиболее важны из них функции, связанные с обменом информацией и координацией научных исследований, что на практике часто способствует прогрессу в той или иной отрасли науки и техники.

В своем большинстве международные научно-технические организации не имеют собственных научно-исследовательских центров (исключения составляют такие, например, организации, как ЦЕРН, Объединенный институт ядерных исследований, ЕВРАТОМ и др.). Деятельность международных организаций по информации и координации в области научных исследований опирается на национальные научно-исследовательские учреждения.

Представляет интерес схема деятельности международных научно-технических организаций в области координации научных исследований. Естественно, что при этом необходимо сделать ряд допущений, связанных с рассмотренными противоречиями участия различных стран в международных организациях.

Совершенно очевидно, что каждая страна в отдельности, даже очень высокоразвитая, не может, или считает нецелесообразным, решать своими силами все научные проблемы, стоящие перед нею на пути ее экономического развития. Отдельные страны сосредоточивают свои основные усилия на решении проблем, наиболее для них важных, к решению которых они наилучшим образом подготовлены. В случае их реализации эти проблемы представляют своеобразный обменный фонд для этих стран, который при определенных условиях может быть ими использован для международного сотрудничества, в частности, по каналам международных организаций. Таким образом, страны, участвующие в таких организациях, вправе рассчитывать на взаимный обмен результатами научных исследований со своими партнерами. В связи с этим эффективная система кооперации и координации на многосторонней международной основе в принципе могла бы позволить отдельным странам продолжать концентрировать свои главные усилия на наиболее актуальных для них проблемах и делать это с наивысшей эффективностью. Более того, система международной координации научных исследований позволила бы наилучшим образом использовать имеющиеся в наличии ресурсы (материальные и людские) и добиться экономии этих ресурсов для использования их либо на расширение внутринациональных исследований, либо на другие экономические нужды.

Для достижения этих целей международная организация должна действовать как некий координационный центр, выполнение рекомендаций которого должно стать объективной необходимостью для стран — членов этой организации. Естественно, что в реальных условиях и особенно в случае участия в международной организации стран с различной социально-политической структурой достижение понимания указанной необходимости затруднительно. При выполнении международной организацией функций координирующего центра имеют место два вида эффективности: эффективность системы в целом и эффективность, получаемая каждой страной-участницей организации. В реальных условиях, учитывая неравномерность научно-технического потенциала в различных странах и качестве их научно-технической инфраструктуры, трудно добиться в результате действия международной системы координации совершенно тождественных уровней эффективности для каждой страны-участницы этой схемы координации. Поэтому указанная схема может иметь ограничение: ее участниками должны быть страны с примерно одинаковым качеством (уровнем) научно-технической инфраструктуры. Кроме того, схема может опираться на традиционно сложившуюся международную организацию, характер деятельности которой носит не директивную, а рекомендательную форму.

С учетом изложенного представляет интерес рассмотреть одну из возможных моделей международной координации научных исследований, которую можно положить в основу функционирования международной научно-технической организации, выступающей в качестве координирующего центра.

1. Пусть какая-то международная организация занимается определенной отраслью науки или научных исследований. Члены этой организации — определенные страны — $a_1, a_2, \dots, a_n$, число которых конечно, и качество научно-технической инфраструктуры в известных пределах находится на одинаковом уровне. Пусть известно множество B научно-технических проблем $b_1, b_2, \dots, b_m$, которые подлежат решению.

2. Перед организацией, представляющей собой международный координирующий центр, стоит задача распределить проблемы по странам так, чтобы обеспечить максимальную эффективность решения этих проблем. Пусть результаты решения каждой проблемы поступают в международную организацию, и каждая страна-участница имеет возможность пользоваться ими. Очевидно, что успешное решение каждой проблемы прямо зависит от того, насколько каждая страна-участница с точки зрения наличия материальных ресурсов и научно-технического потенциала приспособлена к решению той или иной конкретной проблемы.

Пусть каждой паре проблема — страна $b_i a_j$ поставлено в соответствие число e_{ij} , обозначающее меру приспособленности страны a_j к решению проблемы b_i . Будем считать, что затраты ресурсов r_{ij} и r_{ik} стран a_j и a_k на решение проблемы b_i связаны с e_{ij} и e_{ik} так, что если $e_{ij} > e_{ik}$, то $r_{ij} < r_{ik}$.

Определение приспособленности страны к решению некоторой проблемы представляет большую самостоятельную задачу. Решение ее в каждом конкретном случае будет зависеть от многих факторов: наличия материально-технической базы, кадров соответствующей квалификации и т. д.

Мера приспособленности может быть определена экспертным, расчетным или иным путем и оценена по некоторой n -балльной шкале. Совершенно очевидно, что каждая отдельная страна заинтересована прежде всего в решении наиболее важных для себя проблем, выбираемых из всего конечного числа проблем; кроме того, финансовые средства, материальные ресурсы и научно-технический потенциал каждой страны ограничены. В связи с тем, что решение конкретной проблемы определенной страной требует определенных затрат ресурсов, каждая страна может решать лишь легко устанавливаемое ограниченное число проблем.

3. Предположим, что с учетом важности конкретных проблем для определенной страны a_j , с учетом приспособленности страны к их решению и с учетом ресурсов, которыми располагает страна, можно сформировать и охарактеризовать набор проблем B_j , который решает данная страна. Указанный набор проблем, таким образом, определяет объем и качество необходимых для их решения ресурсов R_j .

4. Установление исходных наборов проблем для каждой страны-участницы международной организации является первичным распределением проблем $A^0 = \{a_{ij}^0\}$, где a_{ij}^0 равно единице, если проблема решается страной a_j , и нулю, если проблема ею не решается.

Разумеется, это не обеспечивает максимальной эффективности функционирования всей системы координации в целом. Поэтому задачей международной организации — координационного центра — является такое перераспределение проблем (или ресурсов) по странам, которое обеспечило бы максимальную эффективность решения этих проблем с точки зрения всей системы в целом.

Координацией назовем такое совместное решение проблем различными странами, при котором все проблемы исходного распределения решаются, и при этом каждая страна получает тот или иной выигрыш.

5. Задача координационного центра и состоит в том, чтобы указанное перераспределение сделать как оптимальным, так и адекватным по своей удельной эффективности в отношении каждой страны-участницы. В результате на основе перераспределения проблем и ресурсов приспособленность всей системы в целом возрастает, причем у каждой страны образуется экономия в ресурсах и времени. Прирост приспособленности как в удельном (проблемном) отношении, так и суммарный прирост приспособленности системы в целом может рассматриваться как экономическая мера эффективности координации, которая может быть выражена математически.

Рассмотрим ряд постановок задач, приводящих к различным моделям координации.

МОДЕЛЬ ПРОСТОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБЛЕМ

1. Пусть исходное распределение проблем по странам $\{B_j\}$, $j = 1, \dots, n$, таково, что ни одна проблема набора B_j не входит в набор B_h , и наоборот. Это может произойти, например, в случае, когда выбор проблем странами производится лишь на основании важности проблем для страны, информации о том, есть ли эти проблемы в исходных наборах у других стран, а также информации о располагаемых ресурсах и ресурсах, потребных для решения каждой проблемы. Разумеется, рассмотрение этого весьма искусственного случая может служить лишь иллюстрацией идеи координации. Тогда можно говорить о том, что исходная приспособленность всех стран к решению задач множества $\{B_j\}$ равна

$$E^0 = \sum_{i,j} a_{ij}^0 e_{ij}.$$

Будем считать, что страна a_j может передавать проблему b_i стране a_k только в случае, если $e_{ik} \geq e_{ij}$. Тогда, если страна a_j передает проблему b_i стране a_k , то имеет место элементарный прирост приспособленности всей системы, равный

$$\Delta E = e_{ik} - e_{ij}.$$

Выберем в качестве целевой функции прирост приспособленности всей системы, равный $\sum \lambda_{ijk} (e_{ik} - e_{ij})$, где λ_{ijk} равно единице, если страна a_j передает проблему b_i стране a_k , и нулю — в противном случае.

Если страна a_j отдает проблему b_i стране a_k , то у нее высвобождаются r_{ij} ресурсов, а если она принимает проблему b_i от страны a_k , то она загружает r_{ij} ресурсов. Тогда задача программирования может быть записана

$$\max_{\Lambda} \left\{ \sum_{i,j,h} \lambda_{ijk} (e_{ik} - e_{ij}) \right\} \quad \Lambda = \{\lambda_{ijk}\},$$

при

$$\sum_k \lambda_{ijk} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

$$\sum_{i,k} \lambda_{ijk} r_{ij} - \sum_{i,k} \lambda_{ikj} r_{ij} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$\lambda_{ijk} = 0 \text{ при } e_{ij} > e_{ik}, \text{ в противном случае } -\lambda_{ijk} \geq 0. \quad (3)$$

Ограничение (2) имеет следующий смысл: объем высвободившихся в результате перераспределения проблем ресурсов каждой страны не должен быть меньше объема загруженных в результате перераспределения.

Таким образом, задача координации заключается в том, что максимизируется общая приспособленность всей системы к решению стоящих перед ней проблем при условии, что затраты ресурсов каждой отдельной страны не возрастают. Итогом решения задачи программирования является некоторое оптимальное перераспределение проблем $\Lambda^* = \{\lambda_{ijk}^*\}$. На оптимальном перераспределении для страны a_j достигается экономия ресурсов, равная

$$\sum_{i,k} (\lambda_{ijk}^* - \lambda_{ikj}) r_{ij}.$$

2. Снимем ограничение на исходное распределение, заключающееся в требовании, чтобы каждая проблема входила в исходный набор только одной страны. Пусть

$$0 \leq \sum_i a_{ij}^0 \leq n, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

Этот случай, когда некоторые проблемы могут входить в исходный набор одной или более, чем одной, страны, а некоторые вообще не входят ни в один исходный набор, значительно реальнее. Такая ситуация может возникнуть, если страны формируют свои исходные наборы независимо одна от другой, исходя лишь из важности проблем для себя и учитывая ограниченность своих ресурсов. При таком распределении

каждая страна a_j расходует $R_j^0 = \sum_i a_{ij}^0 r_{ij}$, $j = 1, 2, \dots, n$, ресурсов.

Представляется нецелесообразным сохранять параллелизм, т. е. решать одну и ту же проблему в нескольких странах одновременно, особенно если страны имеют различную приспособленность к решению этой проблемы. Освобождая некоторые страны от необходимости решения тех или иных проблем, получаем возможность направлять высвободившиеся ресурсы либо на решение проблем, первоначально не попавших ни в один из исходных наборов, либо на другие экономические нужды.

В этом случае можно предложить следующую модель перераспределения проблем.

Пусть, как и раньше, передача проблемы b_i от страны a_j к стране a_k может происходить в случае $e_{ik} \geq e_{ij}$. Тогда

$$\begin{aligned} \lambda_{ijk} &\geq 0, \text{ если } e_{ik} \geq e_{ij}; \\ \lambda_{ijk} &= 0, \text{ если } e_{ik} < e_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ &k, j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

Условия отсутствия параллелизма и того, что проблема остается для решения в какой-либо стране, имеют вид

$$\sum_k \lambda_{ijk} = a_{ij}^0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

$$\sum_k \prod_{j \in I_i} \lambda_{ijk} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Условия (4) и (5) означают, что проблема b_i из разных стран передается только в одну страну a_h и что одна и та же страна a_j не может передать одну и ту же проблему в разные страны.

При любом перераспределении $\Lambda = \{\lambda_{ijk}\}$, $i = 1, \dots, m$; $k, j = 1, \dots, n$, удовлетворяющем перечисленным выше условиям, высвободившиеся ресурсы для каждой страны a_j могут быть оценены с помощью выражения

$$R_j^b = \sum_{i, k \neq j} \lambda_{ijk} r_{ij} - \sum_{i, k \neq j} \lambda_{ikh} r_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Естественно потребовать, чтобы эти высвободившиеся ресурсы были неотрицательными, т. е. Λ должно удовлетворять условию

$$R_j^b \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

В качестве целевой функции выберем функцию

$$E = \sum_i \left[\frac{1}{n_i} \sum_{k \in I_i} \lambda_{ikh} e_{ij} \right],$$

где n_i — количество стран, включивших в свои исходные наборы проблему b_i ; I_i — множество индексов этих стран.

Наличие множителя $1/n_i$ под знаком суммы в целевой функции необходимо для того, чтобы изменение значения целевой функции происходило только пропорционально значениям e_{ij} и не зависело от того, сколько стран включило ту или иную проблему в свои исходные наборы. Тогда задача оптимального перераспределения будет заключаться в на-

хождении $\Lambda^* = \{\lambda_{ijk}^*\}$, удовлетворяющего перечисленным выше условиям и максимизирующим E . Высвободившиеся ресурсы позволяют странам решать проблемы, не включенные в исходные наборы. (Возможно, конечно, и иное использование высвободившихся ресурсов.) Если распределение проблем по странам после ликвидации параллелизма и перераспределения более или менее равномерное, что имеет место при приблизительно одинаковом уровне научно-технического потенциала стран, то каждая страна получает возможность решать дополнительно проблемы, в которых она (или содружество стран) заинтересована. В противном случае может быть так, что в наибольшем выигрыше окажутся страны, наименее приспособленные к решению важных для них проблем. Эта ситуация представляет самостоятельный интерес для исследования.

МОДЕЛЬ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБЛЕМ И РЕСУРСОВ

1. Рассмотрим случай, аналогичный случаю 1 модели простого перераспределения проблем, где каждая проблема входит в исходный набор не более чем одной страны.

Пусть теперь страна a_j , передавая проблему b_i стране a_h , компенсирует полностью или частично затраты ресурсов страны a_h на решение этой проблемы. Обозначим размер этой компенсации через r_{ijk} , $i = 1, \dots, m$; $k, j = 1, \dots, n$; $r_{ijk} \geq 0$. В этом случае затраты ресурсов страны a_j за счет передачи проблем другим странам уменьшаются на величину

$$\sum_{i, h} \lambda_{ijk} (r_{ij} - r_{ikh}), \quad j = 1, \dots, n.$$

За счет приема проблем от других стран затраты ее ресурсов увеличиваются на величину

$$\sum_{i,k} \lambda_{ikj} (r_{ij} - r_{ikh}), \quad j = 1, \dots, n.$$

Общая экономия затрат ресурсов страны a_j равна

$$R_j^b = \sum_{i,k} \lambda_{ijk} (r_{ij} - r_{ikh}) - \sum_{i,k} \lambda_{ikj} (r_{ij} - r_{ikh}).$$

Задача программирования в этом случае записывается в виде

$$\max_{\Lambda} \left\{ \sum_{i,j,k} \lambda_{ijk} (e_{ik} - e_{ij}) \right\}$$

при $R_j^b \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n.$

Смысл целевой функции и вид ограничений тот же, что и в модели простого перераспределения проблем. На оптимальном перераспределении $\Lambda^* = \{\lambda_{ijk}^*\}$ для страны a_j достигается экономия ресурсов, равная

$$\sum_{i,k} \lambda_{ijk}^* (r_{ij} - r_{ikh}) - \sum_{i,k} \lambda_{ikj}^* (r_{ij} - r_{ikh}).$$

Легко видеть, что экономия ресурсов каждой страны в этом случае отличается от экономии ресурсов в случае простого перераспределения проблем и зависит от размеров компенсации.

2. Перераспределение ресурсов может быть введено также и при отсутствии ограничений на исходные наборы проблем. В этом случае высвобождающиеся ресурсы для страны равны

$$R_j^b = \sum_{i,k \neq j} \lambda_{ijk} (r_{ij} - r_{ikh}) - \sum_{i,k \neq j} \lambda_{ikj} (r_{ij} - r_{ikh}),$$

и условие (6) заменяется условием

$$\sum_{i,k \neq j} \lambda_{ijk} (r_{ij} - r_{ikh}) - \sum_{i,k \neq j} \lambda_{ikj} (r_{ij} - r_{ikh}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, n.$$

Размер компенсации r_{ikh} может быть пропорционален важности p_{ij} проблемы b_i для страны a_j и тогда

$$r_{ikh} = \frac{p_{ij}}{\sum_j p_{ij}} r_{ik}, \quad j = 1, \dots, n.$$

где p_{ij} — вес проблемы b_i для страны a_j .

В отличие от модели простого перераспределения проблем страны вкладывают ресурсы только в интересующие их проблемы, а в случае заинтересованности нескольких стран в одной и той же проблеме ресурсы для ее решения складываются из ресурсов заинтересованных стран.

Можно установить размер компенсации пропорционально количеству ресурсов, которые должна была бы затратить страна на решение проблем, т. е.

$$r_{ijk} = \frac{r_{ik}}{\sum_j r_{ij}} r_{ij}.$$

Заметим, что во всех описанных выше моделях возможна симметричная постановка задач, заключающаяся в нахождении оптимального распределения проблем по странам, при котором достигается максимум экономии затрат ресурсов при условии, что суммарная приспособленность системы не уменьшается.

В данной работе на простейших моделях проиллюстрированы идеи подхода к математическому описанию системы международной координации и кооперации в области научных исследований. Конечно, эта работа может рассматриваться лишь как первый шаг в этой очень интересной и важной области, и для того чтобы эти модели могли найти практическое применение, нужно решить еще много задач.

Поступила в редакцию
9 III 1970