
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Оптимизация размещения взаимосвязанных
НАОКР на основе двойного аукциона

© 2019 г. А.Н. Козырев

ЦЭМИ РАН, Москва

E-mail: kozyrev@cemi.rssi.ru

Поступила в редакцию 23.05.2018

Статья подготовлена на основе результатов исследования по программе Отделения общественных наук РАН “Национальная экономическая безопасность России в условиях обострения объективных и инициированных рисков и угроз”, 2017 г.

Цель данной работы — предложить эффективное решение на основе теории умных рынков для распределения НАОКР среди потенциальных исполнителей. Предлагаемое решение — оригинальная модификация модели интеллектуального рынка, полученная в виде 2-реплики известной модели внутрифирменного рынка знаний. Показано, что 2-реплика сохраняет основные преимущества исходной модели, в том числе совместимость со стимулами. Модель позволяет сочетать элементы вычислительной эффективности и конкуренции в важном конкретном случае. Если для каждой работы существует только один исполнитель, то оптимальное решение вычисляется достаточно легко. Так же легко оптимальное решение получается для 2-реплики. В 2-реплике уже нет монополии, но зато появляется другая проблема — решение не определяется однозначно. Чтобы избавиться от неоднозначности, предлагается модифицировать модель путем введения в нее случайных отклонений при оценке своих пакетов агентами, а компенсации агентам-победителям определять по правилу второй цены. Доказано, что полученная схема выбора исполнителей совместима со стимулами. Также в работе дана экономическая интерпретация получаемых результатов.

Ключевые слова: знания, совместимость со стимулами, умный рынок, двойной аукцион.

Классификация JEL: C79, O32.

DOI: 10.31857/S042473880004026-7

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределение заданий на проведение НАОКР между потенциальными исполнителями — сложная, но вполне типичная задача для руководства холдингов или государственных корпораций в наукоемких отраслях экономики. В частности, такие задачи возникают в телекоммуникационной отрасли на уровне холдингов (Мирзабеков, 2016), а в ракетно-космической промышленности (РКП) — на уровне отрасли в целом (Пайсон, 2014). Для их решения на практике и в теоретических исследованиях рассматриваются различные организационные схемы, в том числе аукционы разного типа и так называемые умные рынки (smart markets), т.е. рынки с модератором.

В настоящей статье предлагается оригинальная модификация модели умного рынка, получаемая в виде 2-реплики известной модели внутрифирменного рынка знаний (Ba, Stallaert, Whinston, 2001). Каждый участник рынка получает двойника или клона, способного предложить те же услуги по выполнению НАОКР и на тех же условиях. Показано, что 2-реплика сохраняет основные достоинства исходной модели, в том числе совместимость со стимулами, т.е. отсутствие стимулов к сокрытию участниками рынка информации в целях манипулирования рынком. Для частного случая модели удается совместить вычислительную эффективность и элементы конкуренции за получение заказа.

Сложность задачи по размещению НАОКР обусловлена сочетанием сразу нескольких факторов, среди которых ключевую роль играют информационная асимметрия и специфические свойства результатов НАОКР (далее — знания). Дополнительные сложности связаны с наличием разных синергетических эффектов, а также с дискретностью исходной задачи, что затрудняет использование оптимизационных методов.

Информационная асимметрия здесь заключается в том, что исполнителю лучше (чем заказчику) известно, как он собирается выполнять работу, какие возможны издержки и какие ресурсы могут быть использованы. В принципе то же можно сказать и о других видах работ, но именно при выполнении НИОКР, где всегда есть элементы уникальности и творчества, информационная асимметрия проявляется наиболее ярко. Заказчик вынужден либо доверять исполнителю, либо искусственно организовывать конкуренцию между потенциальными исполнителями, либо искать иные стимулы к раскрытию исполнителями информации о своих возможностях, снижению издержек и повышению эффективности. В поисках таких стимулов исследователи потратили немало сил, но до настоящего времени не найдено ничего более эффективного, чем конкуренция.

Специфические свойства знаний, о которых идет речь, многократно описаны в литературе, посвященной экономике знаний (Макаров, 1973, 2003; Козырев, 1999) и связанной с ней тематике (Козырев, 2011; Varian, 1998). В первую очередь это неконкурентность в потреблении, означающая возможность потребления однажды полученного знания практически любым числом экономических агентов без создания каких-либо неудобств друг другу (Samuelson, 1954). Результатам НИОКР это свойство изначально присуще, как минимум, локально, когда речь идет об их использовании внутри холдинга или крупной фирмы со многими подразделениями. В этом смысле дублирование НИОКР — пустая трата ресурсов, а потому оно крайне нежелательно. Более того, в идеале все потенциальные исполнители должны быть специализированы для решения определенных задач, где им не может быть равных. Но это означает отсутствие конкуренции за заказы со всеми вытекающими отсюда последствиями, включая возможность злоупотребления монопольным положением и отсутствие у исполнителей стимулов к снижению затрат при выполнении НИОКР.

Таким образом, исходная задача уже содержит в себе некоторое противоречие. С одной стороны, конкуренция между потенциальными исполнителями нужна, поскольку именно конкуренция лучше всего заставляет раскрывать имеющиеся возможности. С другой стороны, желательна специализация исполнителей по выполняемым функциям и, следовательно, исключение дублирования не только на уровне продуктов, но и на уровне умений, или, как принято говорить сегодня, на уровне компетенций.

Отсюда напрашивается возможное решение — каждый исполнитель должен быть специализирован, но представлен в двух лицах, причем отношения между этими лицами или клонами должны быть конкурентными лишь отчасти. Например, в случае выигрыша конкурса одним из клонов он делится заказом с другим клоном, работу они выполняют совместно, но в разных ипостасях. Смысл выигрыша сводится к распределению ролей и разному вознаграждению руководства клонов. Выигравший становится основным исполнителем, а проигравший — соисполнителем. Именно такая конструкция предлагается в настоящей статье, а затем исследуется с применением формальных математических моделей и методов.

Все необходимые элементы для построения математической модели, соответствующей сказанному выше, уже разработаны и активно используются в математической экономике, теории игр и математическом программировании, а потому не нуждаются в легализации или идеологическом обосновании. Тем не менее некоторые факты, касающиеся свойств знаний и их представления в математических моделях, стоит напомнить.

Как правило, знания в известных математических моделях — это булевские (Данилов, Кошевой, Сотсков, 2003; Arrow, 1962) или вещественные (Козырев, 1999) переменные. Выбор между этими двумя вариантами обычно определяется назначением модели. В нашем случае более подходящими для представления знаний оказываются булевские переменные, что связано с присутствием дискретности в исходной задаче, а отчасти с используемой математической техникой. От переменных, обозначающих обычные продукты, знания отличает иное правило сложения. Для переменных, представляющих знания, сложение идемпотентно, т.е. имеет место равенство $a + a = a$. В моделях с непрерывными переменными вместо операции “+” используется операция максимума (Козырев, 2011), она идемпотентна. Случай с булевскими переменными еще проще. Неконкурентность в потреблении — следствие идемпотентности сложения знаний, или, точнее, неопределенности вычитания. В этом смысле знания — это коллективные блага, или, как иногда говорят, локальные общественные блага.

Рынок таких благ не может быть простым, поскольку традиционные рыночные механизмы здесь работают плохо, причем не только в теории, но и на практике (Clarke, 1971; Groves, 1973). В одних случаях они приводят к дублированию НИОКР, что заведомо расточительно, в других — к проблеме, известной как трагедия общин, когда никто не хочет вкладывать средства в общественное или коллективное благо. Задача оптимизации производства и распределения таких благ еще более усложняется, если они поставляются в пакетах и обладают свойствами дополнителности, что характерно для результатов НИОКР. Тем не менее даже для этого случая существуют модели и алгоритмы решения, имитирующие рынок с регулятором, или умный рынок, организованный на принципах двойного аукциона (Ba, Stallaert, Whinston, 2001). Развитие этих идей в рамках теории создания совместимых со стимулами экономических механизмов представляется интересным как в теоретическом плане, так и в плане возможных практических приложений к решению задачи по размещению НИОКР среди потенциальных исполнителей в наукоемких отраслях. Однако для этого необходимо либо избавиться от ряда недостатков представленной схемы взаимодействия агентов, либо предложить аргументы в пользу возможной компенсации этих недостатков при практической реализации данной организационной схемы. Обе задачи по-своему интересны и далее рассматриваются более подробно.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УМНОГО РЫНКА И ЕЕ РЕПЛИКИ

Предлагаемая математическая модель представляет собой развитие и одновременно специальный случай модели умного рынка знаний, подробно исследованной в работе (Ba, Stallaert, Whinston, 2001). Как и в исходной модели задано множество Ω из m компонентов знания — результатов НИОКР, которые в принципе могут быть получены при наличии соответствующего финансирования. Из него надо выбрать некоторое подмножество для финансирования. Выбрать его надо так, чтобы максимизировать добавленную стоимость вложений в НИОКР для системы в целом, принимая во внимание, что стоимость создается из определенных комбинаций компонентов знания. Заметим, что в 2-реплике модели число компонентов знания остается равным m , множество Ω остается неизменным.

Предполагается, что есть поставщики знания и его потребители, желающие поставлять или потреблять знания в пакетах. То же самое имеет место в 2-реплике модели, но количество тех и других внутри системы удваивается, каждый участник аукциона получает дублера (клона). При этом, как и в исходной модели, внешний потребитель один. Поставщики знаний хотят поставлять пакеты компонентов знания, а не отдельные компоненты, так как некоторые из компонентов — побочные продукты при создании других компонентов знания. Допускается дополнителность между компонентами знания и для поставщиков, и для потребителей. В модели она вводится явным образом. Каждый пакет знаний включает компоненты знаний, которые производятся при выполнении некоторой НИОКР, а также компоненты знания, которые необходимы для ее выполнения. Важно, что потребляемые, т.е. необходимые для выполнения НИОКР компоненты знания, не уничтожаются в ходе выполнения НИОКР, а остаются доступными для использования другими потребителями, или, иными словами, для включения в другие пакеты.

Далее, пусть $\mathcal{K}_s(j) \subseteq \Omega$ — множество создаваемых в пакете j компонентов знания; $\mathcal{K}_c(j) \subseteq \Omega$ — множество потребляемых пакетом j компонентов знания. Потребитель указывает максимальную денежную сумму v_j , которую он готов заплатить за пакет j . Поставщик знания указывает минимальную сумму $|v_j|$, которую он просит за доступ к пакету j . Знак модуля здесь появляется в связи с тем что v_j поставщика — отрицательное число.

Иначе говоря, поставщик пакета j готов поставить набор компонентов знания $\mathcal{K}_s(j)$ при условии, что будет доступно множество компонентов знания $\mathcal{K}_c(j)$. При этом он готов выплатить сумму, не превышающую v_j (при $v_j < 0$ он фактически просит деньги). Тройку $\mathcal{K}_s(j), \mathcal{K}_c(j), v_j$ называют пакетным заказом. Когда $\mathcal{K}_s(j) = \emptyset$, пакет j является пакетом чистого потребителя знания, для которого мы ожидаем $v_j > 0$ (он намерен заплатить v_j , чтобы получить пакет знаний j), а когда $\mathcal{K}_c(j) = \emptyset$, пакет j является пакетом чистого поставщика знания, для которого мы ожидаем $v_j < 0$.

(он просит $-v_j$ за то, что он сделает j доступным). Агент вычисляет собственную оценку своего пакета. Он оценивает его, исходя исключительно из своих представлений об использовании для себя, не учитывает экстерналий или дополнительных выгод, полученных другими агентами. В последующих вычислениях стоимость знаний аддитивна. Полная стоимость компонентов знания для организации — сумма оценок для всех агентов системы. Если агент представляет более одного пакета, их полная стоимость или затраты на них также складываются.

Согласно предположению, сделанному выше, как только компонент знания создан, он становится локальным общественным благом в пределах системы, доступным без дополнительных затрат для вложения в любой пакет. Рынок организован как закрытые торги с двойным аукционом. Потребители или поставщики знания представляют на рассмотрение управляющего системой модератора (маклера) пакетные заказы $K_s(j), K_c(j), v_j$, состоящие из компонентов знания, которые они желают поставить — $K_s(j)$, или хотели бы, чтобы их создали или сделали доступными — $K_c(j)$, вместе с оговоренной ими ценой поставки (или приобретения) v_j . Оценки пакетов и комплектации пакетов закрыты для других участников аукциона.

Модератор (маклер) ищет пакеты знаний, поставляемые в пределах системы, стремясь максимизировать добавленную стоимость — разность между тем, что участники желают заплатить для приобретения пакетов знаний и плату (или затраты), запрашиваемую поставщиками знания за то, что создали компоненты знания или сделали их доступными. Маклер может быть роботом, осуществляющим полностью автоматизированный электронный обмен, или человеком, заинтересованным только в максимизации добавленной стоимости. В любом случае он решает задачу целочисленной оптимизации, формально описанную ниже.

Пусть $|\Omega| = m$, элементы множества W пронумерованы индексами i , принимающими значения от 1 до m . Также есть n торгуемых пакетов, представленных всеми агентами. Пакеты пронумерованы индексами j , принимающими значения от 1 до n . Множество всех пакетов обозначим N . Получаем модель

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{если } i \in K_c(j); \\ -1, & \text{если } i \in K_s(j); \\ 0, & \text{если } i \notin K_c(j) \cup K_s(j), \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{если } j \text{ выбран}; \\ 0, & \text{если } j \text{ не выбран}, \end{cases}$$

где v_j — заявленная цена пакета j .

Задача максимизации добавленной стоимости по отобранным пакетам имеет вид

$$\pi^* = \max \sum_{j=1}^n v_j x_j, \quad (1)$$

при условиях

$$\max_{j=1, \dots, n} [\alpha_{ij} x_j] + \min_{j=1, \dots, n} [\alpha_{ij} x_j] \leq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m, \quad x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, n.$$

В модели рынка (МР) решается, какие компоненты знания будут поставлены при достижении максимума добавленной стоимости от вложений в НИОКР. Величина π^* — максимальная добавленная стоимость, получаемая от торговли пакетами знаний.

Если пакет знаний j влечет потребность в компоненте знания i , к тому же пакет j выбран (т.е. $\alpha_{ij} x_j = 1$), ограничение в задаче влечет необходимость выбрать по крайней мере один пакет k , обеспечивающий поставку компонента знания i (т.е. $\alpha_{ik} x_k = -1$). После того как пакет i стал доступным, прибавление еще одного пакета j^i потребляющего i , не влечет дополнительных затрат или иных эффектов. Ограничение включает член $\max_{j=1, \dots, n} \{\alpha_{ij} x_j\}$, остающийся равным $+1$, пока i необхо-

дим хотя бы в одном потребительском пакете j . Аналогично, при добавлении дополнительного пакета j' , когда компонент i уже обеспечен пакетом j , неизменным и равным -1 , остается $\min_{j=1, \dots, n} \{\alpha_{ij} x_j\}$.

Инвестиции в НИОКР осуществляются отчасти через побочные платежи потребителей знания поставщикам. Вопрос в том, как назначать платежи, чтобы заставить агентов способствовать инвестициям в НИОКР. Если просто запросить у всех потребителей оценки v_j ожидаемой оплаты за выбранные пакеты, возникает проблема безбилетника. Каждый агент заинтересован заявить свою оценку несколько ниже v_j (скажем, $v_j - \theta$) в надежде, что суммарное финансирование другими агентами будет достаточным для выполнения НИОКР. Другие агенты рассуждают таким же образом и тоже занижают свою оценку, провоцируя трагедию общин, когда НИОКР, заслуживающие финансирования, не финансируются именно потому, что их результаты нужны всем и все рассчитывают друг на друга.

Стоит отметить, что решение задачи для исходной МР будет решением и для ее 2-реплики (далее — 2-МР), и даже для ее k -реплики (далее — k -МР) при любом натуральном k . Иначе говоря, будет верным следующее утверждение.

Утверждение 1. Если $\bar{N} \subset N$ обеспечивает решение для МР, т.е. решение задачи максимизации добавленной стоимости в модели (1) достигается при $x_j = 1$ для $j \in \bar{N}$ и $x_j = 0$ для $j \notin \bar{N}$, то $\bar{N}$ обеспечивает решение задачи на максимум добавленной стоимости для модели k -МР при любом k .

Доказательство. Множество всех торгуемых пакетов в модели k -МР то же самое, что и в исходной МР, поскольку дублирование пакетов отсутствует. Поэтому в задаче максимизации добавленной стоимости для модели k -МР реализуется максимум той же целевой функции на том же множестве допустимых решений, что и в МР. А потому оптимальное решение будет тем же самым. Что и требовалось доказать.

3. СОВМЕСТИМЫЙ СО СТИМУЛАМИ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ

Предположим, что стимулы к получению и объявлению заслуживающих доверия оценок v_j возникают у экономических агентов только в связи с необходимостью оплачивать используемые ими знания. Иначе говоря, все агенты предельно рациональны и циничны, простое стремление к правде им неведомо. Если все затраты оплачиваются непосредственно из бюджета холдинга или из государственного бюджета и платежи поступают напрямую исполнителям НИОКР, а не через потребителей знания и рынок, необходимые стимулы для честной оценки отсутствуют. Чтобы гарантировать поставку желаемого знания, потребитель знания согласился бы на заведомо завышенную оценку, порождая нерациональное использование инвестиционных фондов, а поставщик знания мог бы установить $v_j \rightarrow -\infty$, что фактически равносильно отказу выполнять НИОКР.

Таким образом, без перераспределяемых денежных платежей нет стимула для получения точной оценки полезности пакета знаний и затрат на него. Однако денежные платежи должны быть вычислены так, чтобы у каждого агента отсутствовал стимул исказить свою истинную оценку и влиять на результаты выбора пакетов для инвестиций¹.

Важно, что в задаче МР маклер ищет максимум добавленной стоимости от инвестиций в НИОКР в предположении, что ему сообщили правду об оценках, т.е. v_j — настоящая оценка пакета j . Но платежи не должны соответствовать в точности сообщаемым v_j . Их надо рассчитывать так, чтобы стимулировать индивидуально рациональных агентов сообщать правду о своих оценках пакетов. Тогда схема аукциона становится совместимой со стимулами, иначе говоря, раскрытие истинной оценки — доминирующая стратегия для участников аукциона.

Далее будет показано, как такие совместимые со стимулом платежи могут быть вычислены для исходной МР, а затем для ее 2-реплики 2-МР.

¹ Под “искажением” подразумевается не только сознательный обман. Оценка знаний трудна и может потребовать больших усилий. Агент без экономического стимула, возможно, не уделит времени и усилий на получение точной оценки знания. Это поведение будет иметь тот же эффект, как настоящая ложь.

Пусть π^* — оптимальное значение для МР и x^* — оптимальное решение (1). Пакет j , для которого $x_j^* = 1$, называется активным пакетом. Интуитивно понятно, насколько при прочих равных условиях агент может уменьшить свою оценку пакета l так, чтобы пакет l оставался активным. Речь идет об устойчивости решения задачи (1) или, иными словами, о проведении анализа чувствительности (2) модели. В исходной модели решение может быть достаточно устойчивым, но в ее 2-реплике оно заведомо неустойчиво, поскольку каждую пакетную заявку могут предложить два разных участника аукциона, а выбрана может быть только одна. По этой причине совместимые со стимулами механизмы с устойчивым решением для исходной МР и для ее 2-реплики кардинально отличаются. Сначала покажем, как строится совместимый со стимулами механизм для МР в работе (Ba, Stallaert, Whinston, 2001).

Пусть Δ_l^* — максимальная сумма, на которую можно уменьшить оценку, не нарушая устойчивости решения, т.е. до уровня, пока пакет l остается активным. Другими словами, агент ничего не потерял бы, уменьшая свою оценку на сумму менее Δ_l^* . Разумеется, допустимая величина искажения зависит также от оценок других агентов. Чтобы сделать эту зависимость от v явной, данная величина обозначается как $\Delta_l^*(v)$.

Задача поиска допустимого перераспределения для активного пакета l обозначается далее АЧ _{l} и определяется следующим образом:

$$\Delta_l^*(v) \stackrel{def}{=} \max \theta_l \text{ при } \tilde{x}^l(\theta_l) = x^*, \quad (2)$$

где вектор $\tilde{x}^l$ неявно определен как оптимальное решение задачи

$$\tilde{x}^l = \operatorname{argmax} (v_l - \theta_l) x_l + \sum_{j \neq l} v_j x_j, \quad (3)$$

при условиях

$$\max_{j=1, \dots, n} [\alpha_{ij} x_j] + \min_{j=1, \dots, n} [\alpha_{ij} x_j] \leq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m; \quad x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, n.$$

Тогда оптимальное решение удовлетворяет неравенству $\Delta_l^*(v) \geq 0$.

Остается показать, что установление денежных взносов участников на уровне $v_l - \Delta_l^*(v)$ приносит желательную совместимость со стимулами.

Утверждение 2. Если денежные платежи для активных пакетов l рассчитаны как $v_l - \Delta_l^*(v)$, предлагаемый механизм двойного аукциона для МР совместим со стимулами.

Доказательство утверждения представлено в (Ba, Stallaert, Whinston, 2001).

Поскольку $\Delta_l^*(v) \geq 0$, то в итоге потребители знания платят меньше своей оценки, а поставщики знания получают больше, чем их реальные затраты. Стоит заметить, что величина $\Delta_l^*(v)$ может быть очень близкой к нулю или, наоборот, достаточно большой, т.е. при отсутствии конкурирующих предложений возможны очень большие переплаты за выполнение отдельных НИОКР, особенно в условиях многосторонней монополии.

4. СОВМЕСТИМЫЕ СО СТИМУЛАМИ МЕХАНИЗМЫ ДЛЯ 2-РЕПЛИК МОДЕЛИ

Для 2-реплики может быть применена схема выплат, обеспечивающая совместимость со стимулами и вместе с тем позволяющая избежать больших переплат. В частности, это может быть хорошо известная схема второй цены, адаптированная к условиям двойного аукциона. Предполагается, что одинаковые агенты (клоны) могут предлагать пакеты, различающиеся только ценой в каких-то пределах. Активные пакеты выбираются точно так же, как и в модели (1), т.е. выбирается оптимальное решение, но реализуется оно с небольшим уточнением. Пакеты поставщиков принимаются от тех клонов, кто просит меньшую цену, но по более высокой цене другого клона. Аналогично, потребительские пакеты предоставляются клонам, предлагающим большую цену, но по меньшей цене.

Чтобы строго описать данный факт, надо ввести формальное различие между одинаковыми пакетными заявками, предлагаемыми разными участниками аукциона. Каждый активный пакет бу-

дет иметь метку, связанную с тем, какой из двух одинаковых участников подал заявку, получившую одобрение. Условимся считать, что заявки и подавшие их клоны метятся одним или двумя штрихами. Без ограничения общности можно считать, что все активные пакеты помечены штрихом, а пакеты от проигравших конкурсов клонов — двумя штрихами.

В рамках формальной модели отрицательное значение v_l означает, что агент просит денег. Большее значение v_l соответствует меньшей запрашиваемой цене. Аналогично, положительное значение v_l означает, что это предлагаемая цена за пакет l , в этом случае большее значение v_l соответствует большей цене. Иначе говоря, оба случая укладываются в одну и ту же формальную схему. Если одинаковые участники предложили заявки, различающиеся только стоимостной оценкой v'_l и v''_l , то выбирается заявка с более высокой оценкой $v'_l > v''_l$, но оплата при условии включения предлагаемого пакета в оптимальное решение осуществляется по второй (более низкой) оценке v''_l . В случае пакета потребления это означает, что его поставят потребителю по цене, ниже его оценки, а поставщику пакета чистой поставки заплатят по цене, выше его оценки. В такой ситуации исполнителю НИОКР (поставщику знаний) нет смысла завышать оценку. Если он сам дает точную оценку, а его клон — конкурент запросит больше, чем требуется, то эта оценка и станет оплатой для того, кто назвал точную оценку. Если же конкурент занизит свою оценку, то лучше уступить ему заказ, который заведомо не принесет прибыли, чем выиграть этот убыточный заказ или, если быть точнее, заказ, оцениваемый как убыточный.

Проблема выбора возникает в случае когда все агенты верно оценивают свои возможности и потребности, т.е. отсутствует элемент случайности или ошибки. Клоны в таких условиях должны сделать одинаковый выбор, т.е. предложить одинаковые пакетные заявки. В частности, будут равны оценки, сообщаемые агентами-клонами маклеру. В этом случае решение задачи на максимум добавленной стоимости не определяется однозначно, а потому оно паталогически неустойчиво.

В исходной МР такой проблемы нет. Ситуацию с неоднозначным решением задачи на максимум можно считать вырожденным случаем, т.е. решение в общем случае устойчиво. Но в модели 2-МР каждый агент имеет клон, в том числе это касается тех агентов, чьи пакеты выбраны для реализации. Аналогичное предложение его двойника не выбрано, но малейшее изменение оценки первым клоном влечет смену ролей. Если изначально активным был пакет, поставленный клоном одним штрихом, то при малейшем уменьшении оценки активным становится такой же пакет от клона с двумя штрихами. Иначе говоря, верным будет следующее утверждение.

Утверждение 3. *Если в модели 2-МР агенты верно оценивают свои потребности и возможности (случайные ошибки отсутствуют), а предлагаемые одинаковыми агентами одинаковые заявки считаются различными, то ее решение никогда не будет устойчивым. При этом решение (2) и (3) дает $\Delta_l^*(v) = 0$.*

Доказательство непосредственно следует из рассуждения выше.

Таким образом, механизм двойного аукциона для модели 2-МР с нулевыми доплатами из бюджета холдинга не лишен изъянов. Их, как минимум, два. Во-первых, правдивые и при этом точные оценки приводят к ситуации неопределенности, и с вычислительной точки зрения это очень плохо. Во-вторых, при достаточной информированности участников аукциона клоны сообщают равные оценки, т.е. фактически оба остаются без вознаграждения. Точнее, один остается без заказа, а второй выполняет заказ на грани убыточности, что делает такое решение малоприменимым для практики. По этой причине необходимо внести в модель некоторые коррективы.

Например, можно считать, что пакетные заявки, подаваемые одинаковыми агентами, могут различаться в части оценки в каких-то ограниченных пределах, причем вероятность совпадения оценок равна нулю. В частности, можно предположить, что возможно случайное отклонение оценки в ту или иную сторону в каких-то пределах.

Пусть, как уже предлагалось выше, пакеты имеют метки в зависимости от того, какой из двойников (клонов) данный пакет предлагает. Так, в предлагаемых разными клонами пакетах l обозначим оценки через v'_l и v''_l . Если в модели исключаются случайные ошибки, то $v'_l = v''_l$, если ошибки возможны, должно иметь место $v'_l \neq v''_l$. Например, можно считать, что возможно случайное откло-

нение оценки пакета l каждым из клонов в ту или иную сторону от верной оценки v_l на величины ε'_l и ε''_l , принимающие значения в пределах $[-\delta_l, \delta_l]$, причем обе величины распределены равномерно на $[-\delta_l, \delta_l]$. Формально это можно записать в виде $v'_l = v_l + \varepsilon'_l$; $v''_l = v_l + \varepsilon''_l$, где ε'_l и ε''_l — равномерно распределенные на отрезке $[-\delta_l, \delta_l]$ случайные величины. Напомним, что v_l — положительная величина, если агент предлагает заплатить, v_l — отрицательная величина, если он требует оплаты.

Маклер выбирает из двух одинаковых поставщиков того, кто требует (с учетом случайной ошибки) меньшую цену, но платит ему сумму согласно заявке проигравшего. Аналогично выбирается покупатель, готовый платить большую цену, но платит по цене проигравшего (готового платить меньше). Далее будет показано, что при достаточно малых δ_l снова получается совместимый со стимулами механизм, но теперь вероятность совпадения заявок вплоть до оценок равна нулю. Если все заявки сделаны, активные пакеты выбираются практически однозначно. В силу наличия элемента случайности вознаграждение понимается как математическое ожидание. С учетом сказанного, будет верным следующее утверждение.

Утверждение 4. Если для каждого $l \in N$ величина $\Delta_l^*(v)$ строго положительна, то найдется такой набор положительных величин $\{\delta_l\}_{l \in N}$, при котором двойной аукцион второй цены в 2-реплике МР, где оценки $v'_l = v_l + \varepsilon'_l$; $v''_l = v_l + \varepsilon''_l$ определяются с точностью до случайной ошибки с равномерным распределением на интервале $[-\delta_l, \delta_l]$, а денежные платежи для активных пакетов l рассчитаны как $v_l + \min\{\varepsilon'_l, \varepsilon''_l\}$, обеспечивает совместимый со стимулами механизм.

Доказательство. Пусть $\delta_l = \Delta_l^*(v)/2$ для каждого $l \in N$. Тогда понижение цены v_l на величину менее $2\delta_l$ не делает активного пакета неактивным, а неактивного активным. Этого не произойдет при случайном изменении оценки на величину ε'_l или ε''_l . Требуется показать, что в условиях, когда другие агенты играют честно, т.е. отклонения их оценок от v_j распределены в интервалах $[-\delta_j, \delta_j]$, оптимальная стратегия для каждого из клонов l — играть честно, т.е. выбирать v_l .

В силу выбора δ_l случайные отклонения в обозначенных пределах не влекут изменения в наборе активных пакетов. Речь может идти только о смене ролей у клонов, или, иными словами, замене пакета с одним штрихом пакетом с двумя штрихами. Дальнейший анализ сводится к рассмотрению ситуации вокруг одного пакета l . Вопрос в том, будет ли для каждого клона, представляющего пакет l , оптимальной стратегией попытка точно угадать и назвать правильную оценку v_l или же ему следует несколько завышать оценку, чтобы повысить вероятность выигрыша.

Для начала покажем, что математическое ожидание выигрыша положительно, т.е. математическое ожидание платежа при покупке потребительского пакета будет несколько меньше, чем v_l . Математическое ожидание платежа вычисляется по формуле

$$v_l + \int_{-\delta_l}^{\delta_l} \frac{\varepsilon''_l(1-\varepsilon'_l)}{4\delta^2} d\varepsilon''_l = v_l - \frac{\delta_l}{6}.$$

Это значит, что платеж за пакет потребления в среднем будет несколько меньше, чем его истинная ценность, т.е. честное поведение приносит ненулевое вознаграждение. Отметим, что клонам бессмысленно занижать оценку, поскольку в случае выигрыша выплата будет осуществлена по второй цене, которая от такого занижения не меняется. В случае же проигрыша эта цена будет иметь значение, но не для того, кто ее занизил. Иначе говоря, меняется лишь вероятность выигрыша, а именно она снижается. Остается убедиться в бессмысленности попыток манипулирования, т.е. завышения оценки.

Рассмотрим возможность завышения оценки на некоторую величину $\mu > 0$. Достаточно очевидно, что бессмысленно завышение оценки на $2\delta_l$ или больше. При честном поведении клона с двумя штрихами это дает гарантированный выигрыш, но выигрыш равен нулю. Остается проанализировать случай, когда $2\delta_l \geq \mu > 0$. Его удобно разбить на две части.

Сначала рассмотрим $\delta_l \geq \mu > 0$. Математическое ожидание платежа в этом случае равно $v_l - (4\delta^3 - 6\mu\delta^2 + \mu^3)/24\delta^2$. Производная этой величины по μ положительна, т.е. ожидаемая величина платежа монотонно возрастает, достигая при $\mu = \delta_l$ величины $v_l - \delta_l/12$. Также несложно убе-

диться, что на отрезке $[\delta_l, 2\delta_l]$ математическое ожидание платежа продолжает монотонно возрастать до v_l .

Таким образом, завышение оценки также не приносит выгод, как и ее занижение, если клон играет честно. С учетом сказанного ранее это означает, что схема второй цены порождает совместимый со стимулами экономический механизм. Аналогичным образом доказывается, что нет смысла занижать цену на пакет поставки. А это значит, что схема аукциона второй цены для модели 2-МР совместима со стимулами. Что и требовалось доказать.

Замечание. Случайность в определении оценок может быть внесена искусственно, причем конкурирующие за заказ клоны могут знать пределы возможных отклонений от v_l и распределение. В принципе можно рассматривать разные варианты реализации этого механизма.

5. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛИ

Модели, описанные в предыдущих разделах, могут использоваться для вычисления оптимальных распределений инвестиций в знания. Однако для применения на практике решение задач (1) и (2) должно быть выполнимым также в вычислительном отношении. Следующий результат представляет задачу в пессимистическом свете при самом первом ее рассмотрении.

Утверждение 5. *Задачи (1) и (2) в общей форме NP-трудны.*

Доказательство представлено в (Ba, Stallaert, Whinston, 2001).

Однако есть интересные случаи, в которых решение модели двойного аукциона (1) и анализ чувствительности (2) просты в вычислительном отношении. Частный случай, который рассматривается в (Ba, Stallaert, Whinston, 2001), это модель с уникальными поставщиками, т.е. $\forall i: |\{j | \alpha_{ij} = -1\}| = 1$. Данное условие означает, что для каждого компонента знания i есть точно один поставщик (пакет), или, иными словами, что компоненты знания от различных поставщиков уникальны. Это ограничение не представляется слишком ограничительным, поскольку на практике такая ситуация встречается достаточно часто. Зато с вычислительной точки зрения задача становится очень простой. Как показано в (Ba, Stallaert, Whinston, 2001), целочисленную задачу (1) при таком условии можно переформулировать как линейную непрерывную модель с полностью унимодулярной матрицей ограничений, дающую целочисленные решения. В этой модели ограничения $x_j \in [0, 1]$ ослаблены до $0 \leq x_j \leq 1$.

Уместно напомнить, что модель с уникальными поставщиками представляет собой многостороннюю монополию со всеми ее издержками. При этом решение задачи (1) может оказаться очень устойчивым, т.е. переплаты очень большими. Замена модели с единственным поставщиком ее 2-репликой устраняет наличие монополии, не создавая дополнительных вычислительных трудностей, в том числе при несовпадении оценок у клонов.

Для 2-реплики модели вычислительная легкость сохраняется. Такая задача легко сводится к исходной с единственным поставщиком. Что же касается двойственности, то здесь она не играет существенной роли, поскольку платежи исполнителям идут напрямую из центра и взаимные расчеты между ними определяются из иных соображений.

Разумеется, практическая реализация соответствующих организационных схем должна учитывать тот факт, что потенциальный подрядчик, не получивший задания на выполнение НИОКР, должен как-то выживать, не говоря уже о том, что полных клонов не бывает. А потому практическая реализация схемы отличается от идеального варианта. Этот вопрос также заслуживает обсуждения.

Здесь следует вернуться к идее, высказанной во введении. Конкуренция между клонами в качестве исполнителей НИОКР не должна быть абсолютной, когда один из них получает заказ, а другой не получает ничего. Более разумной представляется схема, когда победитель берет проигравшего в субподрядчики, они вместе выполняют работу, а результаты конкурса отражаются только на распределении ролей подрядчика и субподрядчика, а также на вознаграждении руководства. Это вознаграждение может быть привязано к той самой величине, которая составляет выигрыш при

оплате по второй цене. При этом внесения изменений в рассмотренную выше формальную схему не требуется. Она абстрактна и универсальна в достаточной степени, чтобы обсуждаемые здесь различия оставались за рамками модели. Важнее решить проблему, можно ли на практике добиться такого положения, когда победитель конкурса и проигравший вместе выполняют НИОКР, победитель честно делит отдельные работы и ресурсы, а проигравший выполняет задания. Но этот вопрос уже из другой области.

В современных условиях, когда ракетно-космическая промышленность испытывает определенные трудности, но все еще остается на передовом мировом уровне, а телекоммуникационная отрасль оказывается на самом острие борьбы за мировое лидерство не только в этой сфере, но и во многих зависящих от нее областях, повышение качества управления НИОКР становится ключевым фактором обеспечения национальной безопасности. Данная работа не претендует на исчерпывающее решение этой проблемы, однако является вкладом в решение именно этой важнейшей проблемы национальной безопасности.

Поставить управление НИОКР на научную основу с опорой на математические методы, включая математическое программирование, теорию игр и математические модели управления — та задача, которую предполагалось решить в рамках исследования по программе Отделения общественных наук РАН “Национальная экономическая безопасность России в условиях обострения объективных и инициированных рисков и угроз” в 2017 году. Можно надеяться, что в результате удалось найти подходящий для этой задачи математический аппарат на основе современных достижений экономической науки и математической кибернетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов В.И., Кошевой Г., Сотсков А.И. (1993). Экономическое равновесие на рынке интеллектуальных продуктов // *Экономика и математические методы*. Т. 29. № 4. С. 607–616.
- Козырев А.Н. (1999). Алгебраические свойства информации и рынок // *Научно-техническая информация. Сер. I*. № 5. С. 15–20.
- Козырев А.Н. (2011). Моделирование НТП, упорядоченность и цифровая экономика // *Экономика и математические методы*. Т. 47. № 4. С. 131–142.
- Макаров В.Л. (2003). Экономика знаний: уроки для России // *Вестн. Рос. акад. наук*. Т. 73. № 5. С. 450–456.
- Макаров В.Л. (1973). Баланс научных разработок и алгоритм его решения. В сб. ст.: “Оптимизация”. Вып. 11 (28). Новосибирск.
- Мирзабеков А.М. (2016). Создание умного рынка знаний в информационном холдинге // *Биржа интеллектуальной собственности (БИС)*. № 5. С. 15–24.
- Пайсон Д.Б. (2014). Конкуренция в ракетно-космической промышленности. Время ответственных решений // *Экономический анализ: теория и практика*. Т. 13. Вып. 3. С. 2–11.
- Розенмюллер И. (1974). Кооперативные игры и рынки. Воробьева О.Н., Михайлова А.С. (пер. с нем.), Воробьева Н.Н. (ред.). М.: Мир, Библиотека кибернетического сборника.
- Arrow K.J. (1962). Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention. The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors. Princeton: Princeton University Press. P. 609–625.
- Ba S., Stallaert J., Whinston A.B. (2001). Optimal Investment in Knowledge within a Firm Using a Market Mechanism // *Management Science*. Vol. 47 (9). P. 1203–1219.
- Clarke E.H. (1971). Multipart Pricing of Public Goods // *Public Choice*. Vol. 11. P. 17–33.
- Groves T. (1973). Incentives in Teams // *Econometrica*. Vol. 41. P. 617–631.
- Samuelson P. (1954). The Pure Theory of Public Expenditure // *Rev. Econom. Statist.* Vol. 36 (4). P. 387–389.
- Varian H.R. (1998). Markets for Information Goods. Berkeley: University of California. April 1998 (revised: October 16, 1998).

REFERENCES (with English translation or transliteration)

- Arrow K.J.** (1962). Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention. The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors. Princeton: Princeton University Press, 609–625.
- Ba S., Stallaert J., Whinston A.B.** (2001). Optimal Investment in Knowledge within a Firm Using a Market Mechanism. *Management Science*, 47 (9), 1203–1219.
- Clarke E.H.** (1971). Multipart Pricing of Public Goods. *Public Choice*, 11, 17–33.
- Danilov V.I., Koshevoy G.A., Sotskov A.I.** (1993). Equilibrium in an Economy with Intellectual Goods. *Economics and Mathematical Methods*, 29, 607–616 (in Russian).
- Groves T.** (1973). Incentives in Teams. *Econometrica*, 41, 617–631.
- Kozyrev A.N.** (1999). Algebraic Properties of Information and Market // *Scientific and Technical Information*. Ser. 1, 5, 15–20 (in Russian).
- Kozyrev A.N.** (2011). Modeling of NTP, orderliness and the digital economy. *Economics and Mathematical Methods*, 47, 4, 131–142 (in Russian).
- Makarov V.L.** (1973). Balance of Scientific Developments and Algorithm of Its Solution. In: “*Optimization*”, 11 (28). Novosibirsk (in Russian).
- Makarov V.L.** (2003). Knowledge Economy: Lessons for Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 73, 5, 450–456; (in Russian).
- Mirzabekov A.M.** (2016). To Create Intelligent Market Knowledge in Information by Holding. *Intellectual Property Exchange (IPE)*, 5, 15–24 (in Russian).
- Payson D.B.** (2014). Competition in the Rocket and Space Industry. Time Responsible Decisions. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 13, 3, 2–11 (in Russian).
- Rosenmuller I.** (1974). Cooperative Games and Markets. Vorobyova O.N., Mikhailova A.S. (trans.); Vorobyov N. (ed.). Moscow: Mir, Biblioteka kiberneticheskogo sbornika (in Russian).
- Samuelson P.** (1954). The Pure Theory of Public Expenditure. *Rev. Econom. Statist.*, 36 (4), 387–389.
- Varian H.R.** (1998). Markets for Information Goods. Berkeley: University of California. April 1998 (revised: October 16, 1998).

Optimizing the Placement of Interconnected R&D Based on Double Auction

A.N. Kozyrev

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: kozyrev@cemi.rssi.ru

Received 23.05.2018

The article is based on the results of the research on the program “National economic security of Russia in conditions of aggravation of objective and initiated risks and threats” 2017 of the Social Sciences Department of the Russian Academy of Sciences.

The aim of this paper is to suggest effective solution based on the theory of smart markets for distribution of R & D among potential executors (actors). Suggested solution is the original modification of the smart market model obtained as a 2-replica of the well-known intra-firm knowledge market model. It is shown that the 2-replica retains the main advantages of the original model including compatibility with incentives. The model allows combining computational efficiency and competition elements for some impotent special case. If there is only one performer for each job the optimal solution is calculated quite easily. The same easily the optimal solution is obtained for 2-replica. There is no monopoly in 2-replica, but there is another problem. Optimal solution is determined not uniquely. To get rid of ambiguity it is proposed to modify the model by introducing random deviations when evaluating their packages by agents and compensation to agents is determined by the rule of the second price. It is proved that the resulting scheme of choice of actors is compatible with incentives. Some economic interpretation of the results is given.

Keywords: knowledge, compatibility with incentives, smart market, double auction.

JEL Classification: C79, O32.

DOI: 10.31857/S042473880004026-7