

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОНКУРЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЛАЧНЫХ СЕРВИСОВ

П. В. КОНЮХОВСКИЙ, А. С. КУЗНЕЦОВА
Экономический факультет СПбГУ

Статья посвящена вопросам экономико-математического моделирования процессов развития экономики облачных сервисов. В основе подхода, предлагаемого авторами, лежит базовая модель, описывающая конкурентное взаимодействие компаний — провайдеров облачных сервисов. В ее рамках рассматриваются две принципиальные формы конкуренции: конкуренция по вложениям в инфраструктуру отрасли, обеспечивающая в конечном счете рост потребительского спроса, и конкуренция по ценам, воздействующая на распределение спроса между компаниями-конкурентами. Для предложенной в статье базовой модели получены условия ситуаций равновесия, а также описаны возможные варианты развития, основывающиеся на внесении в нее факторов динамики и неопределенности в распределении спроса между компаниями-провайдерами.

Ключевые слова: экономика облачных сервисов, математическое моделирование, равновесие по Нэшу.

Термин «облачные сервисы» вошел в профессиональный оборот в период 2006–2008 гг. (см.: [Antonopoulos, Gillam, 2010]). В настоящее время существует ряд различий в подходах к определению данного понятия. В повседневном общении на интуитивном уровне облачные сервисы продолжают ассоциироваться с внешними (удаленно расположенными) файловыми хранилищами, для которых программно-технические характеристики доступа со стороны конечного пользователя идентич-

ны аналогичным характеристикам его доступа к данным, хранимым на локальном компьютере. Однако за последние годы облачные сервисы кардинально трансформировались из систем хранения информации в системы ее обработки.

В связи с этим ощутимо расширился диапазон исследований, затрагивающих проблематику облачных сервисов [Яблонский, 2011]. Среди наиболее актуальных направлений исследований в этой области могут быть названы:

- влияние программно-технических инноваций на масштабы и скорость распространения облачных сервисов (см., напр.: [Голден, 2012; Облачные вычисления..., 2015]);
- конкуренция и приоритетность конкретных форм функционирования и эксплуатации облачных сервисов (см., напр.: [Кузьмин, 2013]);
- устойчивость и безопасность функционирования облачных сервисов (см., напр.: [Орлов, 2012; Фокин, 2013]);
- «экономика облачных сервисов» в целом (см., напр.: [Аникин, 2013; Ковалев, 2013]).

Основная цель настоящей статьи — *построение математических моделей конкурентного взаимодействия компаний, действующих в сфере облачных услуг и технологий, позволяющих выявлять принципиальные закономерности данного взаимодействия*. Не вызывает особых сомнений актуальность и значимость того влияния, которое оказывают процессы развития облачных сервисов и технологий на сферу менеджмента, на уровне как отраслей и макросистем, так и отдельных компаний и предприятий. При этом самостоятельными объектами для изучения становятся проблемы и специфика менеджмента в компаниях — провайдерах облачных услуг, а также воздействие, которое оказывают облачные технологии на внутрифирменный менеджмент. В данной работе акцент сделан на первой проблематике, связанной со стратегиями поведения компаний — провайдеров облачных сервисов в ситуации их конкурентного взаимодействия.

Развитие сферы ИТ и облачные технологии

Экономическая специфика любой отрасли в существенной мере зависит от объективных физических, технических и технологических процессов, лежащих в ее основе. Традиционно подобные отраслевые характеристики являлись инертными (ригид-

ными) факторами, что предопределяло устойчивость, инерционность правил построения взаимоотношений между участниками отрасли.

«Классическая» схема эволюции типичной отрасли допускает возможность изменения состава рыночных игроков, когда одни компании-лидеры могут сменяться другими. Кроме того, может расти либо, наоборот, сужаться и сам потребительский рынок. Однако «архетипы» поведения, наборы возможных действий, а также системы фундаментальных целей, вокруг которых разворачивается конкурентная борьба, при этом остаются неизменными. Следует отметить, что в настоящее время в сфере облачных сервисов наблюдается качественно иная ситуация. Одним из вероятных исходов процесса развития данной отрасли является ее качественное перерождение.

В свое время важнейшим социально-экономическим последствием феномена возникновения персонального компьютера стало появление «широкого окна возможностей» для становления именно малых форм бизнеса. На начальных этапах развития программно-технического обеспечения персональных компьютеров небольшие динамичные и мобильные компании оказались в преимущественном положении по сравнению с существовавшими в отрасли гигантами ИТ-сферы (на тот момент компании ИВМ и DEC).

Для успеха очередной программной разработки могло быть достаточно наличия «оригинальной идеи» и небольшой группы энтузиастов-единомышленников. Лавинообразный экстенсивный рост числа пользователей персональных компьютеров обеспечивал для вновь созданных продуктов хороший рынок и высокий уровень финансовой отдачи. «Массовость» потребителя ослабляла жесткость конкуренции и предоставляла хорошие шансы на выживание на этапе становления для продуктов, аналоги которых уже существовали.

Образ конкурентной, мобильной отрасли, в которой фирма-новичок имеет возможность, начав с нуля, быстро достигнуть

рыночного успеха исключительно за счет энергии, таланта и плодотворной идеи своих создателей, закрепился за ИТ-сектором почти на три десятилетия. Дополнительный импульс для укрепления данного имиджа дали возникновение интернета и последующая глобализация информационного пространства.

В то же время факторы низкого уровня необходимых начальных вложений и быстрой отдачи, обусловившие высокую конкурентность ИТ-отрасли, предопределили и комплекс ее слабых мест. Объективно низкие издержки распространения программных продуктов породили масштабный теневой сектор распространения нелегального (по сути, краденого) программного обеспечения. Глобализация информационного пространства и технологии массового тиражирования программных средств открыли широкие возможности для распространения вирусных и вредоносных программ.

Безусловно, идеальной и совершенной конкуренции в чистом виде в ИТ-отрасли никогда не существовало. Добившиеся успеха малые бизнес-структуры активно использовали полученное преимущество для поглощения менее удачливых соперников или доминирования над ними. Это достаточно быстро приводило к качественным трансформациям изначально «плоской» структурной картины отрасли.

При этом в ИТ-сфере, возможно более чем в иных отраслях, просматривается зависимость между уровнем децентрализации/монополизации, с одной стороны, и объективным состоянием технологического процесса — с другой.

В связи с вышесказанным феномен облачных сервисов интересен не только из-за того, что он открывает новые возможности для конечного потребителя, ощутимо расширяя спектр оказываемых ИТ-услуг. Он также создает объективные условия для дальнейшего ускорения процессов концентрации и монополизации ИТ-отрасли. Действительно, размещение информации на облачном сервисе позволяет ее владельцу

решить комплекс проблем, связанных с операциями резервирования, восстановления, оперативного доступа. Однако данное решение делает владельца информации зависимым как от провайдера облачного сервиса, так и от провайдера коммуникационной среды.

Следует отметить, что о провайдерах коммуникационных услуг, как правило, вообще не вспоминают либо делают это крайне редко. В то же время они играют ключевую роль в организации процесса функционирования индустрии облачных сервисов. При этом представление этой «третьей стороны» в форме некоего целостного субъекта является весьма условным. За обобщающим термином «провайдер коммуникационной среды», как правило, стоит целая группа экономических субъектов: компания, обеспечивающая функционирование каналов связи, электросетевая компания и т. д. Все они обладают собственными, не обязательно согласованными интересами.

Анализ тенденций последних лет свидетельствует о том, что у большинства потребителей не возникает проблемы выбора между альтернативами «перейти на использование облачного сервиса, снизить издержки хранения и обработки информации, но попасть в зависимость от провайдера этого сервиса» или «сохранить верность традициям, продолжать нести расходы на эксплуатацию собственной информационной системы, но остаться независимым». Скорее, речь идет о темпах перехода на облачные сервисы, а также выборе их конкретных провайдеров и форм использования.

Экстраполируя данные тенденции на обозримое будущее, мы приходим к «ИТ-миру», в котором доминирует несколько лидеров, определяющих правила игры для рынка информационных услуг. На этом рынке, помимо конечных потребителей, присутствуют компании-посредники, образующие своеобразную «клиентулу» лидеров отрасли. Их роль сводится к выполнению вспомогательных сервисных функций на уровне взаимодействия с конечными потребителями.

Подобно тому, как децентрализованная конкурентная среда не только открывает широкие возможности для бизнес-стартов, но и создает благоприятные условия для распространения пиратства и вирусных технологий, последствия процессов концентрации и монополизации также не предполагают однозначных оценок. Аккумуляция ресурсов «в одних руках», с одной стороны, предоставляет дополнительные возможности по интенсивному развитию и внедрению новых технологий, а с другой — дополнительные возможности по подавлению потенциальных конкурентов методами разной степени «рыночности».

Внедрение сервисов *программное обеспечение как услуга* (Software-as-a-Service — SaaS) и *платформа как услуга* (Platform-as-a-Service — PaaS) в значительной степени укрепляет позиции разработчиков программного обеспечения в их борьбе с пиратами. Действительно, централизованная дистрибуция программ из облака убивает пиратство на технологическом уровне. Однако одновременно внедрение данных технологий «асимметрично» усиливает позиции владельцев облачных сервисов и по отношению к их клиентам. Данные клиентов (даже при условии хранения на «необлачных», локальных носителях) обретают ценность исключительно при возможности доступа к инструментам их обработки, т. е. к облачным сервисам.¹ Неоднозначны и последствия влияния облачных сервисов на сферу разработки программного обеспечения. Переход к технологиям централизованной «раздачи софта пользователям» ставит под контроль вла-

дельцев сервисов мелких независимых разработчиков, деформируя условия их конкурентного развития.

Вышесказанное свидетельствует о важности понимания механизмов борьбы за лидерство в сфере облачных сервисов, поскольку оно в конечном счете становится важнейшим условием завоевания ключевых позиций в ИТ-сфере в целом.

Далее в статье рассматривается проблематика разработки и применения экономико-математических моделей, описывающих процессы конкурентной борьбы между компаниями — провайдерами облачных сервисов. Строго говоря, в современном мире мы наблюдаем сегментированную по уровням конкуренцию. С одной стороны, присутствует конкуренция за массового конечного потребителя таких лидеров «облачной индустрии», как Dropbox, Google, Yandex, Microsoft OneDrive (SkyDrive). С другой стороны, существует достаточно представительный слой специализированных провайдеров, ориентированных на конкретные группы потребителей. Как правило, это малые или средние компании того или иного сектора экономики. Заметим, что деятельность этого вида облачных провайдеров может рассматриваться в качестве некоторого противовеса тенденциям к монополизации и концентрации. Данная проблематика, однако, является темой для отдельного исследования.

Применение математических методов в исследованиях экономики облачных сервисов

В настоящее время существует ряд работ, в которых в той или иной степени затрагиваются вопросы применения математических методов к моделированию и анализу процессов функционирования облачных сервисов. Например, представительный обзор современных направлений модельных исследований в данной области предложен в [Karunakaran, Krishnaswamy, Sundarraj, 2015]. В этой статье базовым инструментом анализа являются методы теории

¹ Заметим, что развитие облачных сервисов кардинально трансформирует смысл понятия «персональный компьютер» (PC). Фактически он утрачивает свою «персональность»: данные хранятся на облаке, программное обеспечение, необходимое для работы с ними, также загружается извне, локально установленное программное обеспечение исчерпывается операционной системой и интернет-браузерами, которые «функциональны» исключительно при наличии сетевого подключения.

стратегических игр. Среди работ, посвященных использованию теоретико-игровых подходов к экономике облачных сервисов, может быть отмечена статья [Ardagna, Panicucci, Passacantando, 2011]. В ней рассматривается модель конкурентного взаимодействия SaaS-провайдеров, решающих задачи распределенного размещения своих приложений на мощностях, предоставляемых им IaaS-провайдером (*инфраструктура как услуга*, Infrastructure-as-a-Service).

Предполагается, что каждый SaaS-провайдер решает задачу максимизации прибыли при ограничениях на качество (уровень) предоставляемых услуг, установленных в договорах с конечными пользователями. Прибыль определяется платежами конечных потребителей, варьирующимися в зависимости от качества предоставляемых им услуг, и затратами, возникающими вследствие использования ресурсов IaaS-провайдера. IaaS-провайдер, в свою очередь, решает задачу максимизации доходов от деятельности по предоставлению ресурсов SaaS-провайдерам.

С учетом специфической взаимозависимости действий (стратегий) провайдеров в рамках данной модели для ее анализа была использована концепция обобщенного равновесия по Нэшу (см.: [Debreu, 1952]). В данной работе также предложены алгоритмы распределения ресурсов IaaS-провайдера между SaaS-провайдерами, при которых достигаются обобщенные равновесные состояния, эффективные с точки зрения «социального оптимума».

Еще одним примером приложения теоретико-игровых методов к исследованиям облачных сервисов может служить работа [Jebalia et al., 2015]. В ней, в частности, развиваются подходы, основанные на применении кооперативных игр, для описания процессов взаимодействия провайдеров облачных сервисов. В рамках такого взаимодействия рассматриваются возможности создания общего пула ресурсов, что ведет к повышению доходов от их эксплуатации. При этом возникают дополнительные воз-

можности компенсации издержек за счет повышения уровня предоставляемых услуг, а также их надежности и безопасности. Данные эффекты находят отражение в характеристических функциях кооперативных игровых моделей.

Модели, предлагаемые в настоящей статье, ориентированы на описание процессов экономической конкуренции компаний — провайдеров облачных сервисов. Они носят достаточно общий характер и при необходимости могут быть адаптированы к различным по уровню интеграции и масштабам ситуациям. В частности, речь может идти о конкуренции «глобальных» облачных сервисов (Google, Dropbox, Yandex, OneDrive и т.п.) на относительно изолированном рынке за расширение клиентской базы, привлекаемой на платной основе. В то же время универсальный характер моделей позволяет адаптировать их и к случаям нишевой конкуренции небольших компаний, например SaaS-провайдеров. В качестве принципиального ограничивающего требования выступают условия относительной изолированности взаимодействия конкурирующих субъектов, обеспечивающие соблюдение гипотезы о том, что изменение состава участников рынка маловероятно.

Базовая модель взаимодействия облачных сервисов

В рамках модели конкурентного взаимодействия провайдеров (МКВП) источником дохода компаний (субъектов модели, i — индекс компании, $i \in I = \{1, \dots, m\}$) и, соответственно, объектом конкурентной борьбы является спрос на предоставляемые услуги по хранению информации на облачных серверах. Объемы оказанных услуг (хранимой информации) x_i являются переменными состояниями.

Решения, принимаемые субъектами модели, формализуются в виде следующих параметров:

- p_i — цена за единицу хранимой информации, назначаемая i -й компанией;

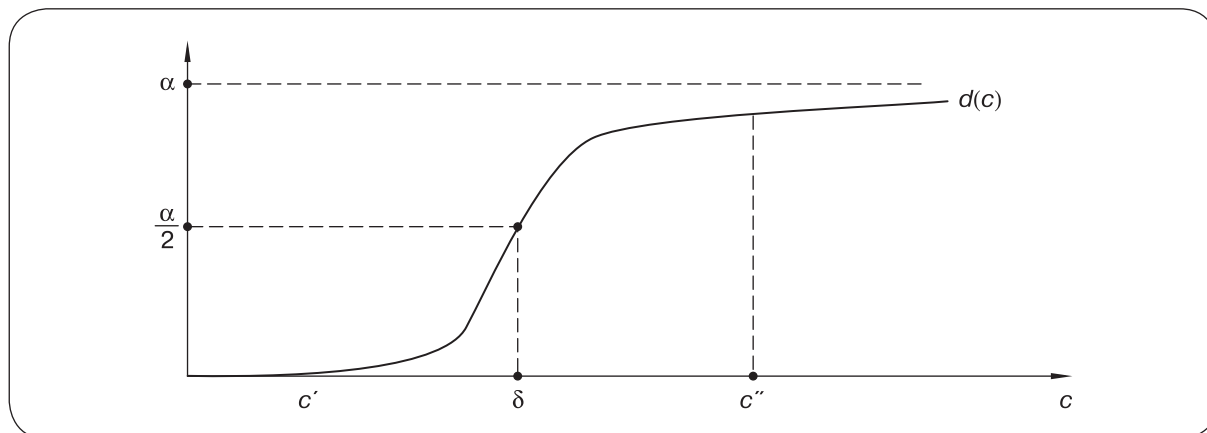


Рис. 1. Функциональная зависимость $d(c)$ — суммарный спрос на услуги облачных сервисов в зависимости от суммарных затрат, базовая модель

- c_i — решение, принимаемое i -й компанией относительно затрат на обеспечение функционирования поддерживаемых компанией информационных сервисов.

Задача сопоставления фактически хранимых объемов информации и затрат на обеспечение необходимых для этого процессов с точки зрения ее экономических аспектов достаточно сложна. В любом случае попытки ее решения путем конструирования каких-либо пропорциональных или непрерывных зависимостей представляются не вполне адекватными. Кроме того, с учетом современной специфики состояния отрасли следует принимать во внимание затраты, связанные с деятельностью по привлечению потенциальных потребителей услуг облачных сервисов за счет предоставления им льготных ресурсов, например бесплатного дискового пространства.

Относительно свойств спроса на услуги облачных сервисов примем следующие предположения.

- (а) Суммарный спрос, предъявляемый на услуги облачных сервисов, является монотонно возрастающей функцией $d(c)$ от суммарного объема затрат компаний-провайдеров $\sum_{i \in I} c_i$. Предполагается, что затраты c_i направляются в том числе на развитие инфраструктуры отрасли, предоставление «стартовых па-

кетов услуг» на бесплатной (условно бесплатной) основе. Это в конечном счете способствует расширению круга потенциальных потребителей.

- (б) Спрос, привлеченный конкретным провайдером, монотонно убывает в зависимости от установленной им цены p_i на оказываемые услуги.

Возможный вид функциональной зависимости $d(c)$, где $c = \sum_{i \in I} c_i$, представлен на рис. 1. Отметим, что конфигурация графика $d(c)$ вполне согласуется с объективными свойствами моделируемых экономических процессов.

График функции $d(c)$ содержит три принципиально различных участка:

- $(0, c')$ — имеет место «несущественный эффект», соответствующий недостаточному уровню затрат компаний-провайдеров;
- (c', c'') — «быстрое возрастание» эффекта;
- $(c'', +\infty)$ — «исчерпание возможностей роста», когда достигнут «естественный» предел объема потребления услуг облачных сервисов.

Для аналитического моделирования зависимости, соответствующей графику на рис. 1, можно использовать различные функции (например, выражения, полученные на основе арктангенса). В нашем случае более предпочтительным с технической

точки зрения представляется применение так называемой функции Хилла (Hill)²:

$$d(c) = \frac{\alpha \cdot e^{\gamma(c-\delta)}}{1 + e^{\gamma(c-\delta)}}. \quad (1)$$

Данная функциональная зависимость достаточно широко применяется в физике, биологии и других естественно-научных отраслях для моделирования процессов, характеризующихся «неравномерной» реакцией на управляющие воздействия.

Параметр δ в зависимости (1) определяет смещение «центральной точки» участка интенсивного роста относительно начала координат, α — точную верхнюю границу для значений функции $d(c)$, γ — «крутизну» подъема на участке интенсивного роста (c' , c'').

На модельном уровне могут быть предложены различные формы реализации предпосылки (b) (об обратной зависимости спроса, предъявляемого на услуги компании-провайдера, по отношению к назначенной цене за эти услуги). В частности, может быть предложен механизм, в соответствии с которым доля от общего спроса, получаемая i -й компанией, составляет

$$\rho_i = \frac{e^{-p_i}}{\sum_{j=1}^m e^{-p_j}}. \quad (2)$$

Очевидно, что выражения (2) удовлетворяют как требованиям предпосылки (b), так и условию нормировки ($\sum_{j=1}^m \rho_j = 1$).

Полезность (доход) i -й компании задается функцией:

$$u_i(\mathbf{p}, \mathbf{c}) = \frac{e^{-p_i}}{\sum_{j=1}^m e^{-p_j}} \cdot p_i \cdot d(c), \quad (3)$$

где $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_m)$, $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_m)$, $c = \sum_{i \in I} c_i$.

Каждая из компаний, реагируя на действия конкурентов, решает задачу выбора

² См., напр.: http://www.graphpad.com/guides/prism/6/curve-fitting/index.htm?reg_classic_dr_variable.htm.

таких значений управляющих параметров (p_i, c_i) , которые максимизируют функцию:

$$\begin{aligned} & \max_{(p_i, c_i)} \{u_i(p_i, c_i, \mathbf{p}_{-i}, \mathbf{c}_{-i})\} = \\ & = \max_{(p_i, c_i)} \left\{ \rho_i \cdot p_i \cdot \frac{\alpha \cdot e^{\gamma(c_i + c_{-i} - \delta)}}{1 + e^{\gamma(c_i + c_{-i} - \delta)}} - c_i \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Векторы $\mathbf{p}_{-i} = (p_1, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_m)$ и $\mathbf{c}_{-i} = (c_1, \dots, c_{i-1}, c_{i+1}, \dots, c_m)$ характеризуют так называемую подситуацию, т.е. выбор всех компаний (участников конкурентной игры), за исключением i -й. Также в дальнейшем будем использовать обозначение³

$$c_{-i} = \sum_{j \neq i} c_j.$$

Через P_i будем обозначать множество допустимых значений цен, которые может назначить компания i , а через C_i — множество допустимых значений для решений компании-провайдера по величине затрат на обеспечение функционирования облачных сервисов.

С учетом формулировок задач (4) «естественным» инструментарием для изучения в рамках рассматриваемой модели становится *равновесие по Нэшу* (см.: [Nash, 1950]), т.е. такая ситуация $(\mathbf{p}^*, \mathbf{c}^*)$, определяемая выбранными стратегиями компаний, от которой ни одной из них невыгодно отклоняться поодиночке (см.: [Gibbons, 1992; Печерский, Беляева, 2001], а также [Конюховский, Малова, 2013]):

$$u_i(\mathbf{p}^*, \mathbf{c}^*) \geq u_i(p_i, c_i, \mathbf{p}_{-i}^*, \mathbf{c}_{-i}^*) \quad (5)$$

при $\forall i \in \{1, \dots, m\}$, $\forall p_i \in P_i$, $\forall c_i \in C_i$.

В силу достаточно непростого вида функциональных зависимостей (4), определяющих полезности компаний-провайдеров, получение явных аналитических выражений равновесных стратегий не представляется

³ Следует обратить внимание на различие между обозначениями $\tilde{\mathbf{p}}_{-i}$ и $\tilde{\mathbf{p}}_{-i}$. В первом случае речь идет об $(m - 1)$ -мерном векторе, представляющем выбор величины издержек каждой из компаний, за исключением i -й. Во втором — о скалярной величине, равной суммарному вкладу всех компаний, за исключением i -й.

возможным. Однако они при необходимости могут быть найдены с помощью стандартных численных процедур.

С учетом задач данного исследования мы сконцентрируем внимание на ряде качественно важных частных случаев конкурентных процессов, которые могут описываться в рамках предлагаемой модели. Мы раздельно рассмотрим процессы конкуренции между компаниями-провайдерами по издержкам и по ценам.

Определенным оправданием подобному подходу может стать довод о том, что процессы конкуренции по издержкам, с одной стороны, и конкуренция по ценам на оказываемые услуги, с другой стороны, соотносятся с разномасштабными временными интервалами. Последствия решений по уровню затрат на «облачную инфраструктуру» проявляются, как правило, с ощутимым лагом. В то же время клиенты, пользующиеся облачными сервисами, могут гибко корректировать свое поведение, реагируя на ценовые изменения.

Модель конкуренции между компаниями-провайдерами по затратам

Прежде чем приступить к анализу конкурентного взаимодействия компаний-провайдеров по затратам (вложениям в инфраструктуру отрасли), целесообразно в явном виде сформулировать выражение для оптимальных затрат в условиях монополии. Это предоставит некоторый «предельный» ориентир, с которым могут быть соотнесены те изменения, которые вносит фактор конкуренции.

Если на рынке услуг облачных сервисов действует единственная компания-монополист, то свое решение по величине вложений в инфраструктуру отрасли (c^*) (в рамках рассматриваемой нами модели) она будет определять в результате решения задачи

$$\max_c \{u(c)\} = \max_c \left\{ p \cdot \frac{\alpha \cdot e^{\gamma(c-\delta)}}{1 + e^{\gamma(c-\delta)}} - c \right\}. \quad (6)$$

Необходимое условие экстремума для задачи (6) принимает вид

$$\frac{du(c)}{dc} = \frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot e^{\gamma(c-\delta)}}{(1 + e^{\gamma(c-\delta)})^2} - 1 = 0. \quad (7)$$

Необходимым и достаточным условием существования вещественных корней у уравнения

$$\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot e^{\gamma(c-\delta)}}{(1 + e^{\gamma(c-\delta)})^2} = 1, \quad (8)$$

которое необходимо решить для нахождения стационарных точек, является выполнение неравенства

$$|p \cdot \alpha \cdot \gamma| \geq 4. \quad (9)$$

В силу экономического смысла параметров p , α , γ из (9) получаем

$$p \cdot \alpha \cdot \gamma \geq 4. \quad (10)$$

При выполнении данного условия корни уравнения (8) определяют точку локального минимума функции $u(c)$

$$\begin{aligned} \underline{c} &= \frac{1}{\gamma} \times \\ &\times \ln \left(\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma - 2 - \sqrt{(p \cdot \alpha \cdot \gamma)^2 - 4 \cdot p \cdot \alpha \cdot \gamma}}{2} \right) + \delta \end{aligned} \quad (11)$$

и точку ее локального максимума

$$\begin{aligned} \bar{c} &= \frac{1}{\gamma} \times \\ &\times \ln \left(\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma - 2 + \sqrt{(p \cdot \alpha \cdot \gamma)^2 - 4 \cdot p \cdot \alpha \cdot \gamma}}{2} \right) + \delta. \end{aligned} \quad (12)$$

На рис. 2 (в качестве примера) представлен график поверхности, отражающий поведение функции $u(c)$ при различных значениях параметра δ ($-2 \leq \delta \leq 2$). Значения остальных параметров установлены как $p = 1$, $\alpha = 1$, $\gamma = 6$.

Для большей наглядности на рис. 3 сопоставлены кривые, соответствующие графикам $u(c)$ для конкретных значений δ .

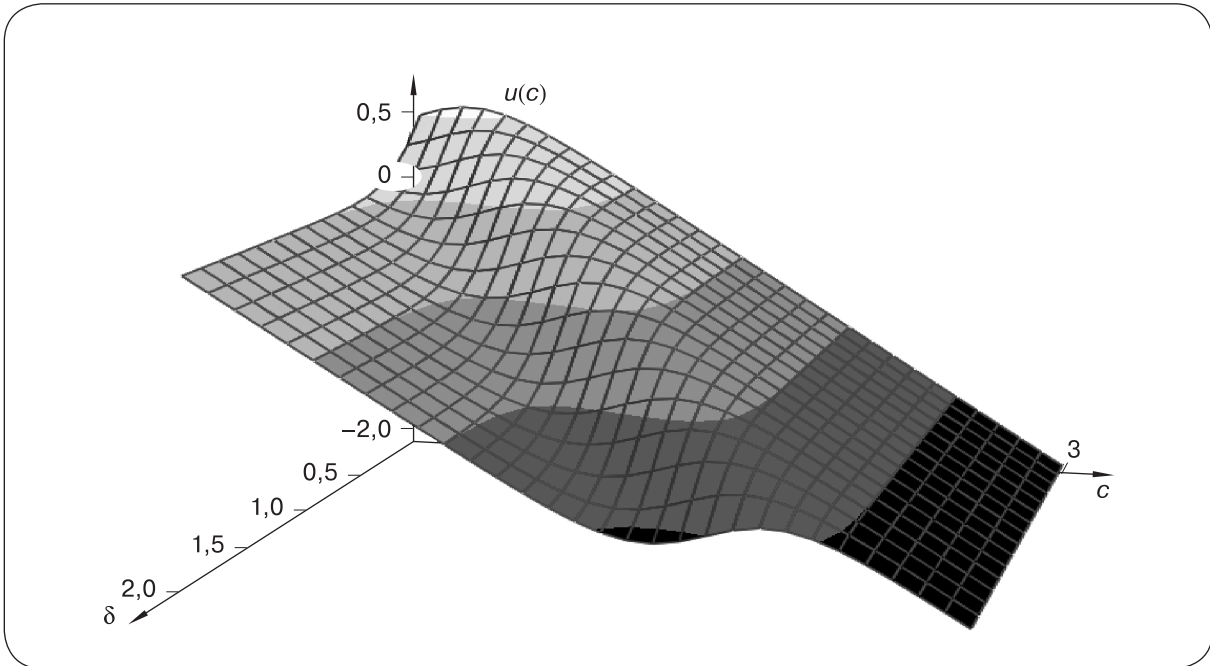


Рис. 2. Поверхность, соответствующая функции $u(c, \delta)$ — полезности компании-провайдера в случае монополистического рынка при различных значениях параметра δ

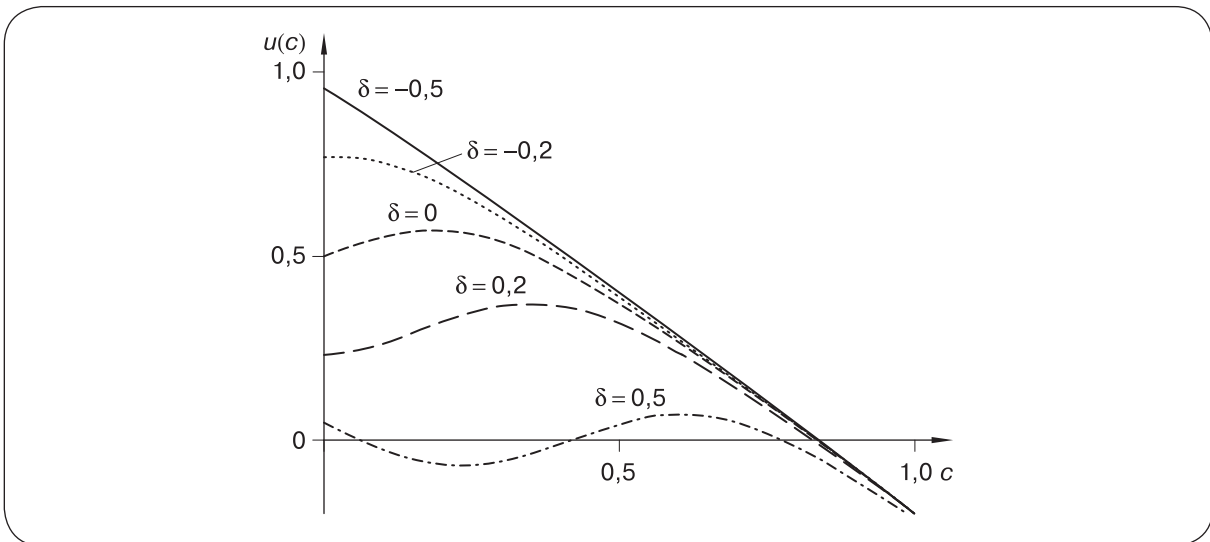


Рис. 3. Графики функции полезности компании-провайдера $u(c)$ в случае монополистического рынка при различных значениях параметра δ

Из рис. 3 видно, что в зависимости от конкретного значения δ в задаче (6) на интервале $c \in [0; +\infty]$ глобальный максимум может достигаться как на границе ($c = 0$), так и в некоторой внутренней точ-

ке c^* . Первый вариант означает, что компании-провайдеру нецелесообразно осуществлять затраты (вложения в инфраструктуру отрасли), второй свидетельствует о существовании некоторого оптимального

объема затрат c^* , который максимизирует полезность провайдера.

Рассмотрим теперь ситуацию, предполагающую существование на рынке облачных сервисов нескольких (m) компаний, конкурирующих на уровне решений по вложениям в инфраструктуру отрасли $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_m)$. Для чистоты исследования именно этого вида конкуренции согласимся с допущением о том, объеме рынка (суммарный спрос) определяется исключительно размером вложений в инфраструктуру отрасли $c = \sum_{i=1}^m c_i$, после чего распределяется между компаниями-конкурентами просто в некоторых фиксированных пропорциях $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_m$ ($\rho_i \geq 0, \sum_{i=1}^m \rho_i = 1$). Отметим, что данная гипотеза не противоречит условиям работы сформировавшегося, стабильного рынка. Соответственно, логично предположить, что и цены, конкуренцию по которым мы в данном случае исключаем из рассмотрения, колеблются около некоторого среднеотраслевого уровня p .

Таким образом, задача, решаемая отдельной i -й фирмой, примет вид

$$\begin{aligned} \max_{c_i} \{u_i(c_i, c_{-i})\} &= \\ = \max_{c_i} \left\{ \rho_i \cdot p_i \cdot \frac{\alpha \cdot e^{\gamma(c_i + c_{-i} - \delta)}}{1 + e^{\gamma(c_i + c_{-i} - \delta)}} - c_i \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Несложно заметить однотипность задач (13) и (6). Выражение для наилучшего ответа фирмы i на действия конкурентов $c_{-i} = \sum_{i \neq j} c_j$ примет вид

$$\begin{aligned} c_i^* &= \frac{1}{\gamma} \times \\ \times \ln \left(\frac{\xi_i - 2 + \sqrt{\xi_i^2 - 4 \cdot \xi_i}}{2} \right) + \delta - c_{-i} \end{aligned} \quad (14)$$

при условии $\xi_i = \rho_i \cdot p_i \cdot \alpha \cdot \gamma \geq 4$.

Если обозначить

$$\beta_i = \frac{1}{\gamma} \cdot \ln \left(\frac{\xi_i - 2 + \sqrt{\xi_i^2 - 4 \cdot \xi_i}}{2} \right),$$

то условия равновесия для всех компаний игроков (наилучший ответ каждого на наилучшие ответы остальных) примут вид

$$c_i^* = \beta_i + \delta - c_{-i}^*, \quad i \in \{1, \dots, m\}, \quad (15)$$

где $c_{-i}^* = \sum_{i \neq j} c_j^*$.

Из (15) следует

$$\forall i \in \{1, \dots, m\} \quad c^* = c_i^* + c_{-i}^* = \beta_i + \delta,$$

что возможно только при равенстве всех β_i ($\beta_i = \text{const}$), а это, в свою очередь, означает

$$(\forall i \in \{1, \dots, m\}) \quad \rho_i = \frac{1}{m}, \quad p_i = p = \text{const},$$

т. е. ситуация равновесия в конкурентной борьбе нескольких компаний-провайдеров (по решениям о затратах на развитие инфраструктуры отрасли) возможна при условии равного раздела рынка между ними и установления одинаковой цены на оказываемые услуги.

В этом случае издержки в состоянии равновесия задаются формулой

$$c_i^* = \frac{\beta + \delta}{m}, \quad i \in \{1, \dots, m\}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{\gamma} \times \\ \times \ln \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma}{m} \right) - 2 + \sqrt{\left(\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma}{m} \right)^2 - 4 \cdot \frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma}{m}} \right) \right). \end{aligned}$$

На рис. 4 приведен пример конкурентного взаимодействия двух компаний-провайдеров ($m = 2$) в случае асимметрии в назначаемых ими ценах и получаемых долях рынка. Предполагается, что фирма 2 выбирает некоторый уровень издержек $c_2^{(1)}$, после чего на данное решение реагирует фирма 1 и устанавливает свои издержки в соответствии с формулой для наилучшего ответа (14) как

$$c_1^{(1)}(c_2^{(1)}) = \beta_1 + \delta - c_2^{(1)}.$$

На следующем шаге уже фирма 2, отвечая на выбор фирмы 1, устанавливает издержки как

$$c_2^{(2)}(c_1^{(1)}) = \beta_2 + \delta - c_1^{(1)}$$

и т. д.

Как видно из рис. 4, фирма 2, у которой параметр β_i больше, чем у фирмы 1

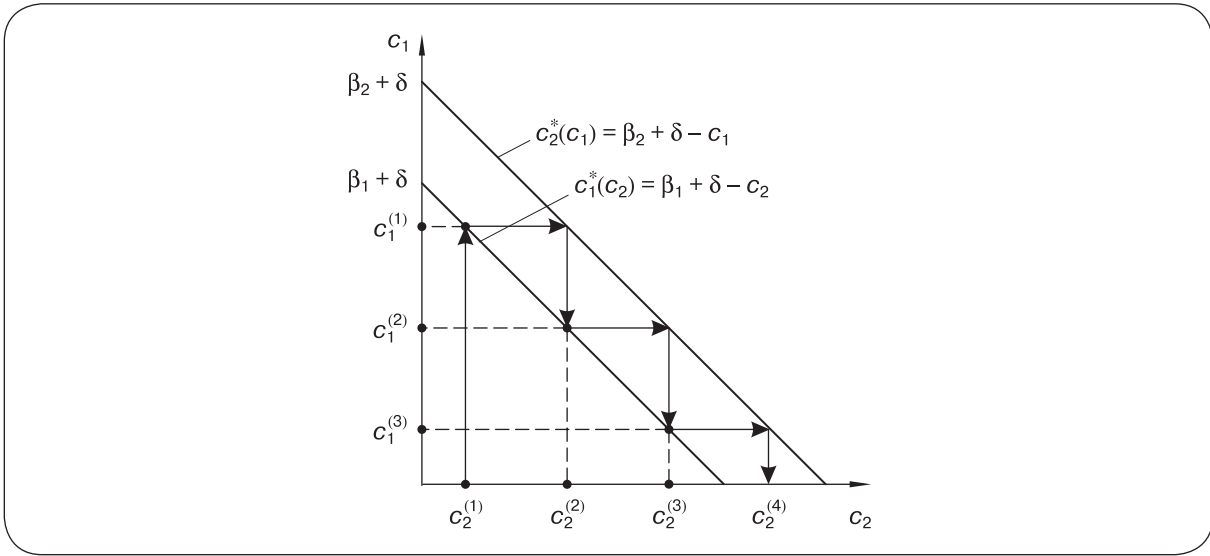


Рис. 4. Последовательность наилучших ответов двух компаний-провайдеров, конкурирующих по издержкам

($\beta_2 > \beta_1$), при выборе очередного наилучшего ответа на действия конкурента должна постоянно увеличивать объем издержек:

$$c_2^{(1)} < c_2^{(2)} < c_2^{(3)} < c_2^{(4)}.$$

В то же время фирма 1 их, наоборот, на каждом шаге снижает, в конечном счете доводя до нуля:

$$c_1^{(1)} > c_1^{(2)} < c_1^{(3)}.$$

Разумеется, возможность возникновения подобной ситуации на реальных рынках облачных сервисов в чистом виде выглядит маловероятной. Одновременно нельзя и не признать того, что построенная модель вполне адекватно представляет возможную асимметрию в ценах и распределении рынка как потенциальный источник стимулов «жить за счет других». Кроме того, она позволяет построить механизм эволюции этих стимулов: у кого именно из участников рынка они объективно более существенны, как могут развиваться во времени и т. д.

В плане исследования свойств равновесного решения (16) достаточно интересной

выглядит идея его сравнения с аналогичным решением (12), полученным для ситуации монопольного присутствия на рынке единственной компании-провайдера:

$$\bar{c} = \frac{1}{\gamma} \times \ln \left(\frac{1}{2} \cdot \left(p \cdot \alpha \cdot \gamma - 2 + \sqrt{(p \cdot \alpha \cdot \gamma)^2 - 4 \cdot p \cdot \alpha \cdot \gamma} \right) \right) + \delta.$$

В случае конкуренции m компаний их суммарные издержки составят

$$c^* = \sum_{i=1}^m c_i^* = \frac{1}{\gamma} \times \ln \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma}{m} - 2 + \sqrt{\left(\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma}{m} \right)^2 - 4 \cdot \frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma}{m}} \right) \right) + \delta.$$

Рассмотрев разность между \bar{c} и c^* , получаем

$$\bar{c} - c^* = \frac{1}{\gamma} \times \ln \left(\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma - 2 + \sqrt{(p \cdot \alpha \cdot \gamma)^2 - 4 \cdot p \cdot \alpha \cdot \gamma}}{\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma}{m} - 2 + \sqrt{\left(\frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma}{m} \right)^2 - 4 \cdot \frac{p \cdot \alpha \cdot \gamma}{m}}} \right) > 0. \tag{17}$$

В содержательном плане неравенство (17) означает, что оптимальные издержки (вложения в инфраструктуру отрасли) в условиях монополии *всегда оказываются больше*, чем в случае конкуренции на рынке m независимых субъектов. Разумеется, это заключение необходимо сопроводить принципиальной оговоркой о том, что оно справедливо исключительно при условии выполнения всех предпосылок изучаемой модели. Данное свойство, по существу, является аналогом эффекта, получившего после публикации [Hardin, 1968] название «трагедия общин» («проблема общего»). Как известно, эффект «трагедии общин» проявляется в том, что в условиях децентрализованного хозяйствования общий ресурс эксплуатируется более интенсивно (чрезмерно интенсивно), чем при централизованном управлении.

Модель конкуренции между компаниями-провайдерами по ценам

Рассмотрим теперь возможности использования базовой модели взаимодействия компаний — провайдеров облачных сервисов для анализа их стратегий ценовой конкуренции.

Как отмечалось, мы будем полагать, что на уровне ценовой конкуренции компании-игроки делят между собой некоторый фиксированный суммарный спрос (d), сформировавшийся под влиянием ранее осуществленных совместных инфраструктурных вложений.

Тогда функция полезности для некоторой компании i ($i \in \{1, \dots, m\}$) (при условии выполнения предпосылки о влиянии цен на распределение долей рынка в форме (2)) примет вид

$$u_i(p_i, p_{-i}) = d \cdot \frac{e^{-p_i}}{\sum_{j=1}^m e^{-p_j}} \cdot p_i - c_i. \quad (18)$$

Из симметричности условий для всех компаний-игроков следует, что в условии равновесия они должны назначить равные цены. В то же время величина равновесной

цены должна быть такой, чтобы ни у одного из участников не было стимулов к тому, чтобы отклониться от нее и перетянуть на себя дополнительную долю рынка.

Условие для наилучшего ответа i -го игрока в ситуации, когда остальные игроки придерживаются цены p_{-i} , имеет вид

$$\frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} = d \cdot \frac{e^{-p_i} \cdot (e^{-p_i} + (m-1) \cdot (1-p_i) \cdot e^{-p_{-i}})}{(e^{-p_i} + (m-1) \cdot e^{-p_{-i}})^2} \quad (19)$$

Из (19) следует

$$\frac{e^{p_i}}{m-1} = e^{p_i} \cdot (p_i - 1), \quad (20)$$

откуда и получаем выражение для равновесной цены

$$p_i = W\left(\frac{e^{-p_i}}{m-1}\right) + 1, \quad i \in \{1, \dots, m\}, \quad (21)$$

где $W(\circ)$ — функция Ламберта (напомним, что функцией Ламберта называется функция, обратная к функции $f(w) = w \cdot e^w$).

Таким образом, в данной модели ценовой конкуренции компании-провайдеры для достижения состояния равновесия должны устанавливать равные цены на уровне, задаваемом выражением (21).

На рис. 5 приведен график функции полезности для одной компании (см. (18)) при следующих значениях параметров: $d = 1$, $c_i = d/4$.

Поверхность, представленная на рис. 5, достаточно наглядно отражает факт существования точек максимума по переменной p_i для функции $u_i(p_i, p_{-i})$ для каждого фиксированного p_{-i} .

Графики, приведенные на рис. 6–7, отображают соотношение функций полезности для случая конкуренции по ценам двух фирм (i, j). Цена, назначаемая фирмой i , обозначена как p_i , цена фирмы j — как p_j . Заметим, что при конкуренции двух фирм ($m = 2$) $p_{-i} = p_j$.

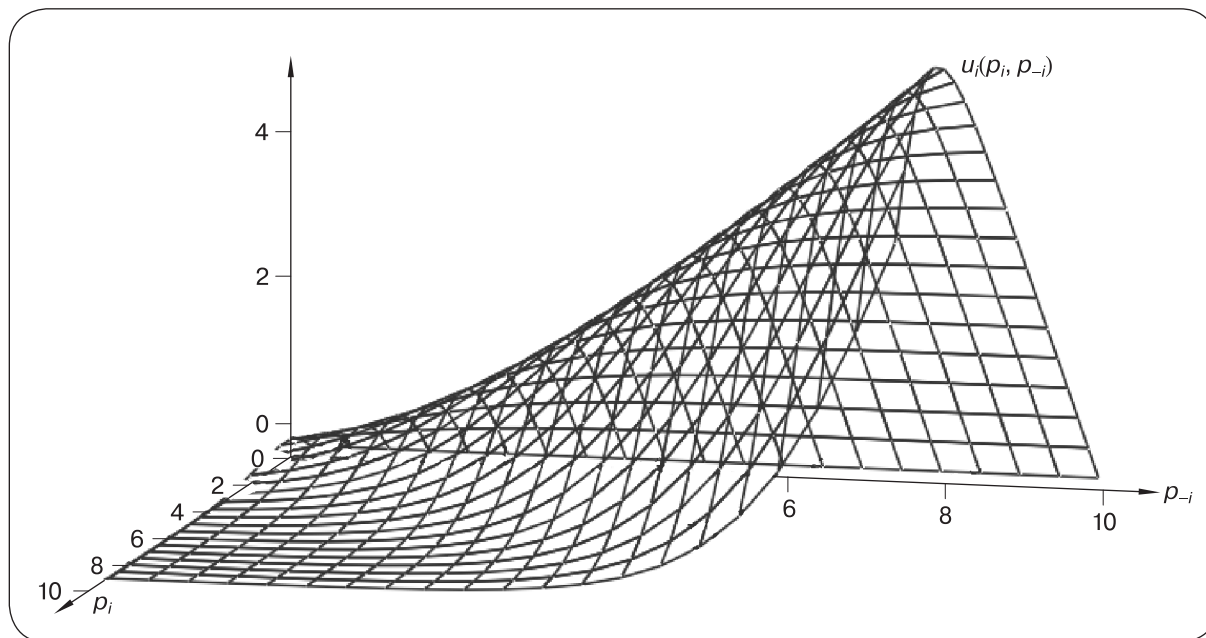


Рис. 5. График функции полезности компании-провайдера, задаваемой выражением (18)

Пересечение линий наилучших ответов (см. рис. 7, на котором показаны линии уровня поверхностей $u_i(p_i, p_j)$ и $u_j(p_i, p_j)$) определяет точку равновесия по ценам $\mathbf{p}^* = (p_i^*, p_j^*)$. Как несложно заметить, для случая двух игроков ($m = 2$) в соответствии с (21) получаем

$$p_i^* = p_j^* = 2.$$

Следует особо отметить, что механизм раздела рынка между компаниями-конкурентами, задаваемый выражениями (2), позволяет им договориться и установить сколь угодно высокую цену. Однако при отклонении цены от равновесных значений (21) у каждого из участников «сговора» возникают стимулы нарушить соглашение и получить еще большую выгоду.

Поскольку в представленной в данном разделе модели рассматривается процесс ценовой конкуренции, ее можно трактовать в качестве одной из модификаций классической модели Бертрана. Вместе с тем нельзя не признать, что данная аналогия носит достаточно условный характер. В первую очередь это связано с принятыми

допущениями относительно вида функциональных зависимостей, описывающих механизмы ценовой конкуренции (2).

Модифицированная модель взаимодействия облачных сервисов

Возможное (и достаточно очевидное) направление развития базовой модели взаимодействия компаний — провайдеров облачных сервисов связано с усложнением и повышением уровня адекватности функциональной зависимости $d(c)$, задающей суммарный спрос на услуги облачных сервисов. Вполне разумным представляется допущение о том, что отдача от вложений в инфраструктуру облачных сервисов может иметь не одно-, а многоступенчатый характер (см. рис. 8).

В этом случае для моделирования может быть использована функция

$$d(c) = \sum_{k=1}^K d_k(c) = \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_k \cdot e^{\gamma_k(c-\delta_k)}}{1 + e^{\gamma_k(c-\delta_k)}}. \quad (22)$$

Функция (22) представляет собой сумму конечного числа функций Хилла. Величина

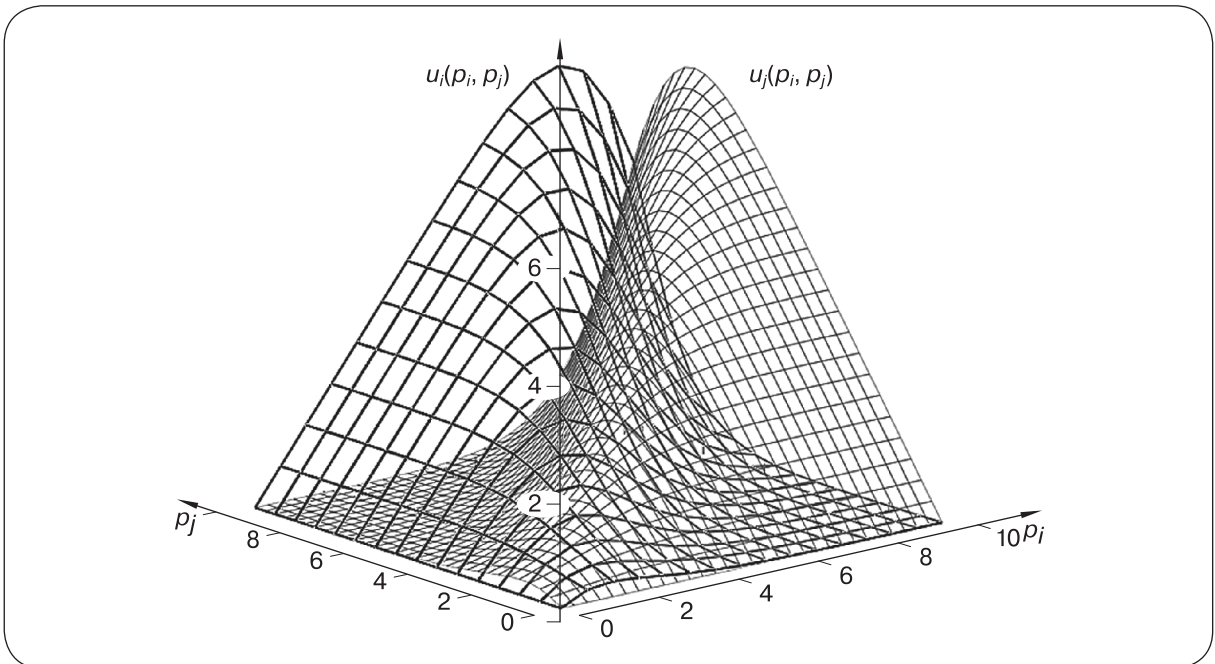


Рис. 6. Соотношение графиков функций полезностей двух фирм (i, j) для процесса ценовой конкуренции в рамках базовой модели

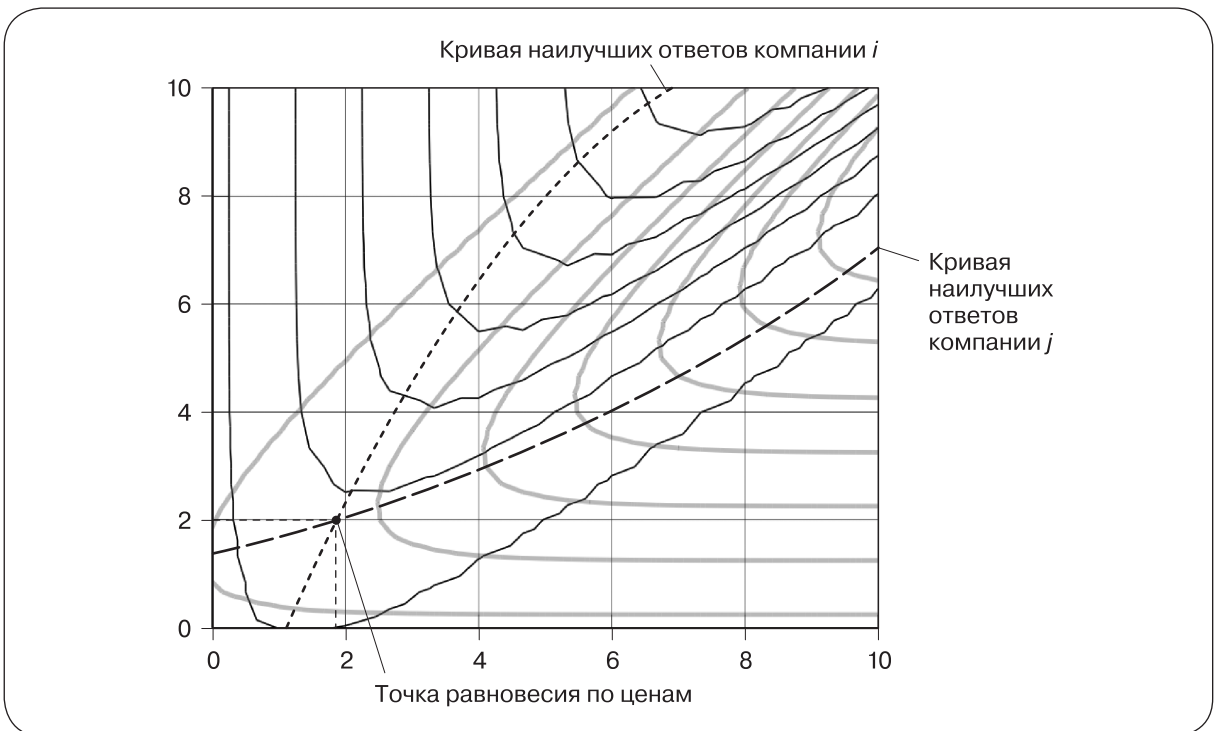


Рис. 7. Соотношение графиков функции полезностей двух фирм (i, j) для процесса ценовой конкуренции в рамках базовой модели (линии уровня)

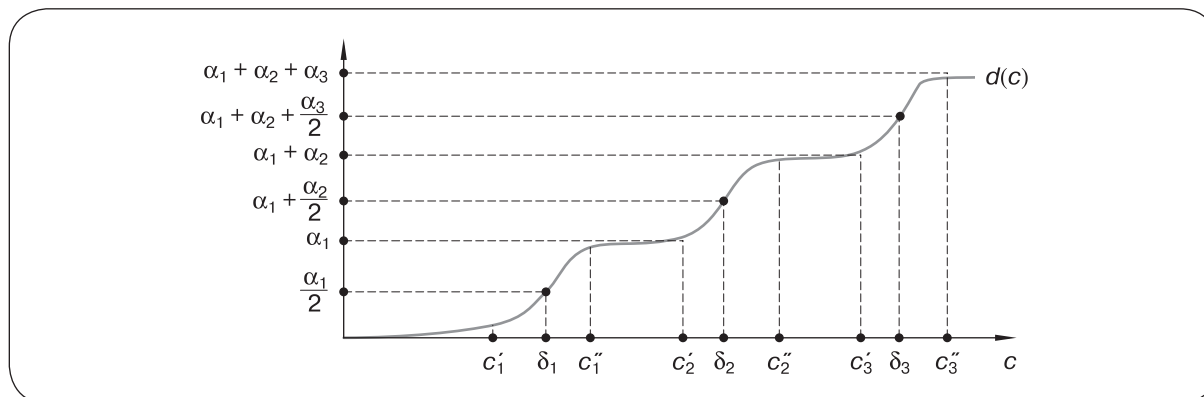


Рис. 8. Функциональная зависимость $d(c)$ — суммарный спрос на услуги облачных сервисов в зависимости от суммарных затрат, модифицированная модель

K определяет количество «качественных» ступенчатых скачков. На рис. 8 представлен график функциональной зависимости данного класса при $K = 3$.

«Принципиальный вид» поверхности, отражающей поведение функции полезности отдельно взятой (i -й) компании-провайдера для модифицированной модели, представлен на рис. 9 (значения параметров приведены в табл. 1).

Очевидный интерес вызывает вопрос о существовании для модифицированной модели равновесных ситуаций, аналогичных решению (16), т.е. ситуаций, в которых фирмы несут равные инфраструктурные издержки и при этом спрос в равных долях делится между ними.

На рис. 10 представлена поверхность, иллюстрирующая, как в случае принятия всеми компаниями решения об одинаковых издержках на уровне c_i будет меняться функция полезности отдельной компании в зависимости от c_i и числа компаний на рынке (m).

Из рис. 10, а также рис. 11, на котором представлены «срезы» поверхности $u_i(c_i, m)$ для $m = 1, 2, 4$, можно сделать вывод, что при определенных значениях параметров модифицированной модели взаимодействия компаний — провайдеров облачных сервисов в ней могут существовать равновесные ситуации, аналогичные решению (16) базовой модели.

Динамическая модель облачного сервиса

Еще одно «естественное» направление развития базовой модели облачного сервиса связано с привнесением в нее фактора динамики. Для решения этой задачи следует перейти к рассмотрению модели функционирования компании — провайдера облачных сервисов на дискретной временной сетке $t \in \mathbf{T} = \{0, 1, \dots, T, \dots\}$.

Введем допущение о возможности представления «существенных» состояний моделируемых объектов (компаний-провайдеров $i \in \{1, \dots, m\}$) в виде последовательности величин $\{p_{it}\}_{t \in \mathbf{T}}$ и $\{c_{it}\}_{t \in \mathbf{T}}$, где

- p_{it} — цена за единицу хранимой информации, назначаемая i -й компанией в момент времени t ;
- c_{it} — решение, принимаемое i -й компанией относительно затрат на обеспечение процессов функционирования поддерживаемых информационных сервисов в момент времени t .

Соответственно, действия всех участников в t -м периоде описываются векторами

$$\mathbf{p}_t = (p_{1t}, \dots, p_{it}, \dots, p_{mt})$$

$$\text{и } \mathbf{c}_t = (c_{1t}, \dots, c_{it}, \dots, c_{mt}),$$

а также величинами суммарных вложений в инфраструктуру облачной отрасли

$$c_t = \sum_{i=1}^m c_{it}.$$

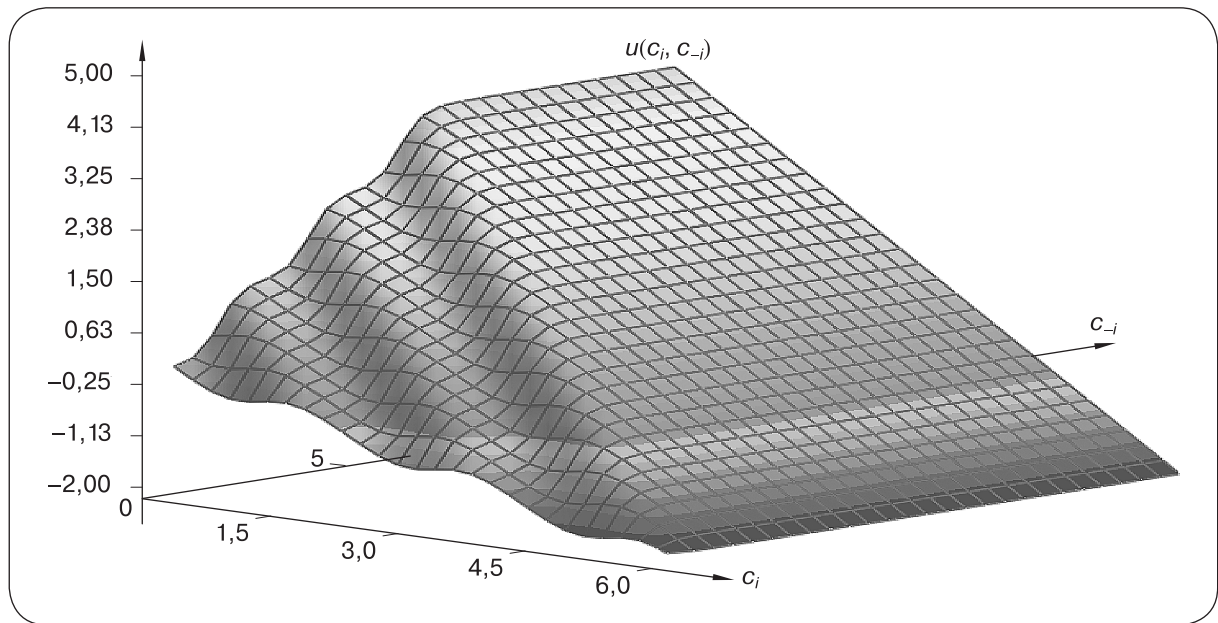


Рис. 9. Функции полезности компании-провайдера $u_i(c_i, c_{-i})$ для модифицированной модели

Таблица 1

Пример условных значений параметров функции полезности провайдера $u_i(c_i, c_{-i})$ для модифицированной модели

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
p	1	α_1	5	γ_1	4	δ_1	2
m	4	α_2	5	γ_2	4	δ_2	4
		α_3	5	γ_3	4	δ_3	6

За основу при построении аналитической зависимости, задающей в динамической модели полезность (доход) i -й компании в момент времени t , можно взять функцию (3) из базовой модели. Принципиальное изменение связано с необходимостью учета в t -м периоде «общих» вложений в инфраструктуру облачных сервисов, осуществленных в предшествующих периодах.

Определение числа будущих периодов, на которые вложения, сделанные в момент времени t , оказывают влияние, является самостоятельной и нетривиальной задачей. В рамках настоящей статьи мы ограничимся допущением о том, что спрос, предъявляемый на услуги облачных сервисов в период t , непосредственно зависит от вложений в их инфраструктуру, осуществленных в пред-

шествующий период $t - 1$. Тогда функции полезности компаний примут вид

$$u_{it}(\mathbf{p}_t, \mathbf{c}_{t-1}, \mathbf{c}_t) = \frac{e^{-p_{it}}}{\sum_{j=1}^m e^{-p_{jt}}} \cdot p_{it} \cdot d(c_{t-1}) - c_{it}. \quad (23)$$

Предметом исследования для моделей облачных сервисов класса (23) становятся равновесные траектории $\{\mathbf{p}_t, \mathbf{c}_t\}_{t \in \mathbf{T}}$, от которых всем игрокам нецелесообразно отклоняться в течение полного периода $t \in \mathbf{T} = \{0, 1, \dots, T\}$.

Как нетрудно догадаться, нахождение данных траекторий в аналитической форме весьма затруднительно. Однако их исследование может быть произведено в рамках имитационных моделей, построенных на основе динамических соотношений (23).

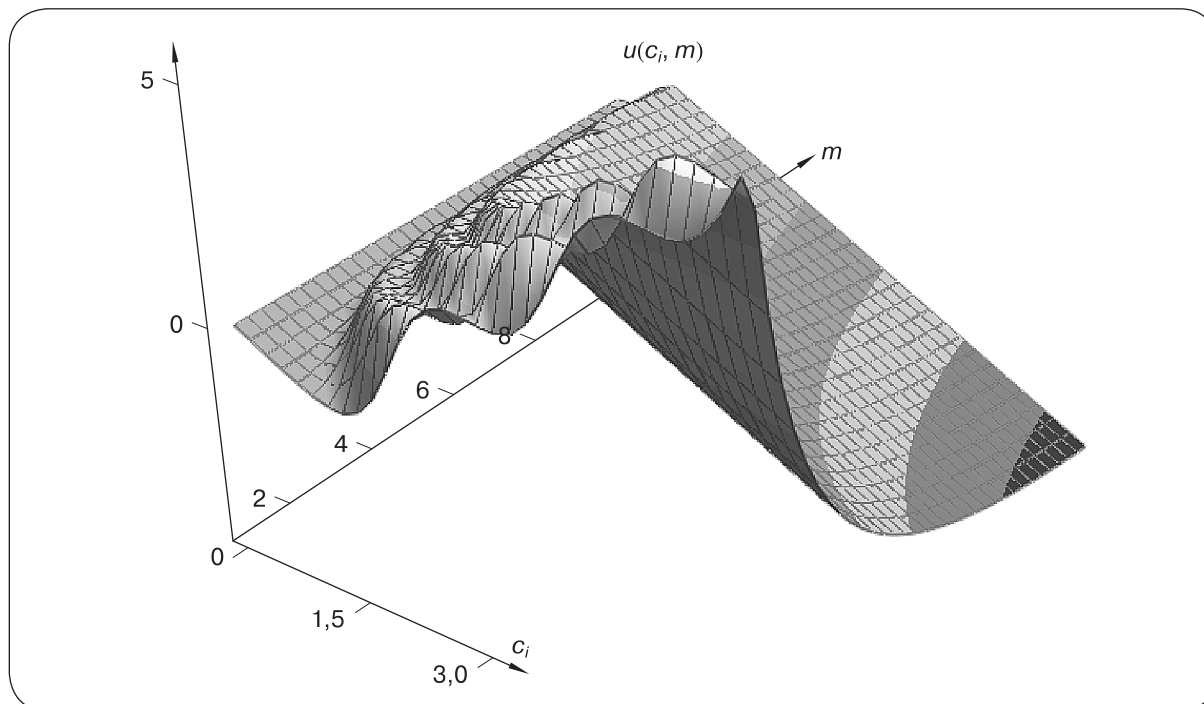


Рис. 10. Зависимость значений функции полезности компании-провайдера от значения издержек (c_i) и от числа компаний ($m = 1, \dots, 10$) в ситуации выбора всеми компаниями значения издержек c_i

При этом в основу имитационных экспериментов, проводимых с целью выявления («нащупывания») на эмпирическом уровне равновесных траектории развития рынка облачных сервисов, могут быть положены ранее полученные нами в рамках стационарных моделей решения (14), (16), (21).

Стохастические расширения модели облачного сервиса

В свою очередь, последующее развитие моделей вида (23) в рамках технологии имитационного моделирования предполагает внесение в них элементов рандомизации. Допущение о том, что доход (полезность) компаний $d(c)$, порождаемый их суммарными вложениями в инфраструктуру облачной отрасли, распределяется в соответствии с некоторыми детерминированными коэффициентами p_i , зависящими исключительно от ценовой политики, нельзя отнести к разряду беспорных. В первую оче-

редь наиболее уязвимой стороной данной предпосылки является игнорирование в ней фактора случайности.

Этот недостаток может быть отчасти исправлен при переходе к моделям, в которых коэффициенты распределения дохода рассматриваются в качестве реализаций случайных величин ρ_i . При этом законы распределения $F_{\rho_i}(x)$ считаются заданными, а их параметры (математическое ожидание (μ), дисперсия (σ^2))⁴ могут рассматриваться как функции от решений, принятых компаниями на предыдущих этапах, относительно величины цен. В этом случае функции полезности компаний примут вид

$$\tilde{u}_{it}(\mathbf{p}_t, \mathbf{c}_{t-1}, \mathbf{c}_t) = \tilde{\rho}_{it} \cdot p_{it} \cdot d(c_{t-1}) - c_{it}, \quad (24)$$

⁴ Очевидно, что при моделировании поведения коэффициентов ρ_{it} могут быть применены различные законы распределения, но вполне разумным и приемлемым, по крайней мере на начальном этапе, выглядит решение о выборе нормального закона.

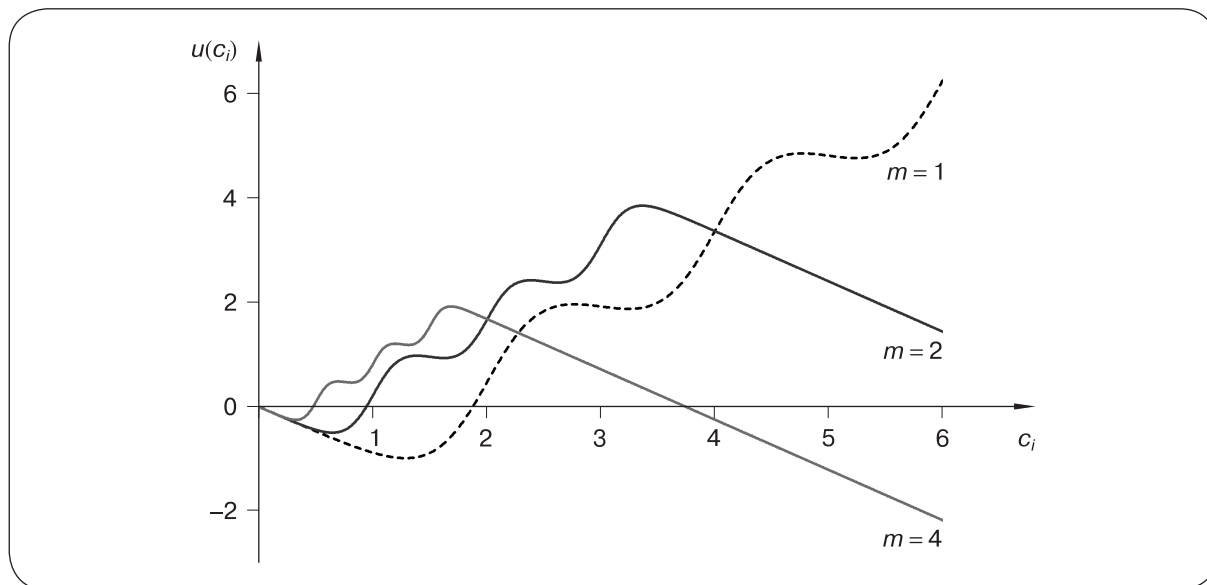


Рис. 11. Зависимость значений функции полезности компании-провайдера от значения издержек c_i и от числа компаний ($m = 1, 2, 4$) в ситуации выбора всеми компаниями значения издержек c_i

где

$$\tilde{\rho}_{it} \in F_{\tilde{\rho}_{it}}(\mu(p_{i,t-1}, \dots, p_{i,t-\tau}), \sigma^2(p_{i,t-1}, \dots, p_{i,t-\tau})),$$

$\tau = 1, 2, \dots$ — количество периодов, предшествующих текущему, оказывающих влияние на распределение рынка в текущем периоде.

По аналогии с моделями вида (23) в моделях вида (24) фундаментальным предметом исследований остаются равновесные траектории поведения фирм-игроков на рынке услуг облачных сервисов. В данном случае речь идет об устойчивости политики решений по назначаемым ценам и инфраструктурным издержкам, которая выдерживает флуктуации в процессе распределения рыночного спроса, возникающие вследствие действия причин и факторов, имеющих стохастическую природу.

Одним из важнейших направлений развития стохастических модификаций моделей облачных сервисов могут стать исследования процессов эволюции стратегий компаний-провайдеров в течение времени. В частности, речь идет о выявлении усло-

вий существования эволюционно устойчивых стратегий поведения компаний на рынке облачных сервисов.

Напомним, что в соответствии с классическим определением, данным Дж. М. Смитом, стратегия называется эволюционно устойчивой (в рамках рассматриваемой совокупности (популяции) игроков), если она оказывается более успешной по сравнению с иными (мутантными) стратегиями при условии, что основная часть представителей популяции использует именно ее (количество игроков, применяющих мутантные стратегии, незначительно) [Smith, 1958; 1968; 1982].

Развитие предложенных в настоящей работе моделей облачных сервисов на базе методологии теории эволюционных игр представляется весьма интересным и плодотворным направлением их развития, так как позволяет сформулировать условия эволюционной устойчивости равновесных траекторий поведения компаний — провайдеров облачных сервисов, а также объяснить объективные причины их отклонения от данных траекторий.

Заключение

Базовая модель, предложенная в настоящей статье, в силу своего теоретического характера абстрагируется от значительного числа параметров и характеристик процессов конкурентного взаимодействия в сфере облачных сервисов. Вряд ли было бы правомерным ставить вопрос о построении конкретных прикладных методик расчета цен, устанавливаемых провайдерами, или их ожидаемых издержек на основе выражений для наилучших ответов игроков в данной модели (см., например, выражения (15) или (21)).

Тем не менее они позволяют оценить вклад, вносимый в динамику цен и издержек тенденциями, стимулирующими достижение рынком облачных услуг равновесного состояния. Разумеется, на данном рынке существуют и тренды иной природы. В реальности же мы можем наблюдать лишь некоторые итоговые (интегрированные) значения.

Результаты анализа и сопоставления фактических значений с расчетно-теоретическими, соответствующими равновесным трендам, несомненно, способствуют расширению и качественному повышению уровня научной достоверности представлений о процессах эволюции экономики облачных сервисов. Более того, полученные выводы могут быть распространены

на другие высокотехнологичные отрасли, имеющие аналогичную природу.

Обращаясь к направлениям развития данной статьи, в первую очередь хочется обратить внимание читателя на интерес и значимость проблемы разработки для базовой модели ее модификаций, основанных на допущении о существовании компании-лидера. В некотором смысле речь идет об аналогах моделей дуополии по Штакельбергу и моделей лидерства в ценах для базовой модели облачных сервисов.

«Раздельность» оптимизационных процедур (по издержкам и по ценам), рассмотренных в статье, несомненно, может рассматриваться некоторым недостатком предлагаемого подхода. Решение задачи одновременной оптимизации как по инфраструктурным издержкам (c_i), так и по ценам (p_i) представляет несомненный интерес. В то же время нельзя не признать факт существования объективных технических сложностей при решении подобной задачи. В любом случае речь не идет о нахождении решения в аналитической форме. В конечном счете решения относительно величины затрат на инфраструктуру и уровня цен сосуществуют в разновременных масштабах. Тем не менее постановка и решение задач одновременной оптимизации также могут рассматриваться в качестве одного из возможных направлений для последующего развития настоящего исследования.

ЛИТЕРАТУРА НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

- Аникин Л. 2013. Стагнация экономики приведет к взлету облачного рынка. *Обзор: Облачные сервисы 2013*. http://www.cnews.ru/reviews/new/oblachnye_servisy_2013/
- Голден Б. 2012. Облачные сервисы: прогнозы, протестированные временем. *Мир ПК* (3). <http://www.osp.ru/pcworld/2012/03>
- Ковалев В. 2013. Риски провайдера облаков и банка несопоставимы. *Обзор: Облачные сервисы 2013*. http://www.cnews.ru/reviews/new/oblachnye_servisy_2013/

- Конюховский П. В., Малова А. С. 2013. *Теория игр*. М.: «Юрайт».
- Кузьмин С. 2013. Передавая ИТ под управление облачного сервис-провайдера, мы экономим средства. *Обзор: Облачные сервисы 2013*. http://www.cnews.ru/reviews/new/oblachnye_servisy_2013/
- Облачные вычисления (мировой рынок)*. 2015. <http://www.tadviser.ru/index.php/>
- Статья: *Облачные вычисления (мировой рынок)*

- Орлов С. 2012. Облачные сервисы: безопасность и надежность. *Журнал сетевых решений/LAN* (12). <http://www.osp.ru/lan/2012/12/13033028/>
- Печерский С. Л., Беляева А. А. 2001. *Теория игр для экономистов*. СПб.: Изд-во Европейского университета в СПб.
- Фокин Н. 2013. Миф о небезопасности облаков начинает развеиваться. *Обзор: Облачные сервисы 2013*. http://www.cnews.ru/reviews/new/oblachnye_servisy_2013/
- Яблонский С. А. 2011. Введение в экосистему «облачных вычислений». *Программная инженерия* (2): 27–38.

REFERENCES IN LATIN ALPHABET

- Antonopoulos N., Gillam L. (eds). 2010. *Cloud Computing: Principles, Systems and Applications*. Springer: London.
- Ardagna D., Panicucci B., Passacantando M. 2011. *Generalized Nash Equilibria for the Service Provisioning Problem in Cloud Systems*. Report No. 2011.27. <http://home.deib.polimi.it/ardagna/CloudGamesTechRep2011.pdf>
- Debreu G. 1952. A social equilibrium existence theorem. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* **38**: 886–893.
- Gibbons R. 1992. *Game Theory for Applied Economists*. Princeton University Press.
- Hardin G. 1968. The theory of the commons. *Science* **162**: 1243–1248.
- Jebalia M., Letaïfa A., Hamdi M., Tabbane S. 2015. An overview on coalitional game-theoretic approaches for resource allocation in cloud computing architectures. *International Journal of Cloud Computing* **4** (1): 63–77.
- Karunakaran S., Krishnaswamy V., Sundarraj R. 2015. Business view of cloud: Decisions, models and opportunities — a classification and review of research. *Management Research Review* **38** (6): 582–604.
- Nash J. F. 1950. The bargaining problem. *Econometrica* **28**: 155–162.
- Smith J. M. 1958. *The Theory of Evolution*. Penguin Books: London.
- Smith J. M. 1968. *Mathematical Ideas in Biology*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Smith J. M. 1982. *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Translation of references in Russian into English**
- Anikin L. 2013. The stagnation of the economy will lead to the take-off of the cloud market. *Обзор: Облачные сервисы 2013*. <http://www.cnews.ru/>
- Golden B. 2012. Cloud services: predictions, tested by time. *Mir PK* (3). <http://www.osp.ru>
- Kovalev V. 2013. Risks cloud provider and the bank are not comparable. *Обзор: Облачные сервисы 2013*. <http://www.cnews.ru>
- Konyukhovskiy P. V., Malova A. S. 2013. *Theory of Games*. M.: Yurayt.
- Kuzmin C. 2013. Passing under the control of the IT cloud service provider, we save money. *Обзор: Облачные сервисы 2013*. <http://www.cnews.ru/>
- Cloud computing (mirovoy rynok)*. 2015. [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Облачные_вычисления_\(мировой_рынок\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Облачные_вычисления_(мировой_рынок))
- Orlov S. 2012. Cloud services: security and reliability. *Zhurnal setevykh reshenij / LAN* (12). <http://www.osp.ru/lan/2012/12/13033028/>
- Pechersky S. L., Belyaev A. A. 2001. *Game theory for economists*. SPb.: Publishing house of the European University in St. Petersburg.
- Fokin N. 2013. The myth of insecurity begins to dispel the clouds. *Обзор: Облачные сервисы 2013*. <http://www.cnews.ru>
- Yablonsky S. A. 2011. Introduction to the ecosystem of cloud computing. *Programm-naya inzheneriya* (2): 27–38.

Статья поступила в редакцию
17 марта 2015 г.