

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫХ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ МАСШТАБНЫХ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ¹

Пономарев А. В.²

(ФГБУН СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург)

Системы, использующие элементы масштабных человеко-машинных вычислений (краудсорсинг, крауд-вычисления), получают в последнее время достаточно широкое распространение при решении целого ряда практических задач. Одной из основных проблем, связанных с применением человеко-машинных вычислений, является качество результатов, получаемых таким образом. Перспективным подходом к проектированию подобных систем является применение теоретико-игрового моделирования ситуации (участника системы и способа распределения вознаграждения), чтобы принятый способ распределения вознаграждения способствовал приложению участником максимальных усилий и, соответственно, достижению целей создателя системы. В статье представлены результаты обзора в области применения теоретико-игровых моделей для рационального проектирования систем, использующих масштабные человеко-машинные вычисления. В частности, на основе проведенного исследования выявлены допущения, используемые при теоретико-игровом моделировании таких систем, и основные классы моделей. Полученные результаты сгруппированы в соответствии с типологией систем масштабных человеко-машинных вычислений. Показано, какие допущения, цели моделирования и виды моделей характерны для каждого выделенного типа таких систем. Обзор может быть полезен как практикам, осуществляющим создание программных систем, включающих элементы масштабных человеко-машинных вычислений, так и исследователям, работающим в этой области.

Ключевые слова: крауд-вычисления, краудсорсинг, коллективный интеллект, человеко-машинные системы, теория игр, дизайн механизмов, аукционы.

1. Введение

Под масштабными человеко-машинными вычислениями (МЧМВ) понимается такая организация процесса сбора и обра-

¹ Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0005.

² Андрей Васильевич Пономарев, к.т.н. (ponomarev@iias.spb.su).

ботки информации, при которой для выполнения части операций привлекается широкое сообщество людей, как правило, взаимодействующих посредством сети Интернет. Системы, использующие элементы МЧМВ, получают в последнее время достаточно широкое распространение в целом ряде приложений, среди которых можно выделить crowdsensing (удаленный сбор информации с помощью распределенного сообщества), «гражданскую науку» (citizen science – применение усилий сообществ волонтеров при обработке научных данных), совместное создание карт, подготовку размеченных наборов данных и валидацию результатов работы систем машинного обучения.

Простым, но достаточно распространенным сценарием применения МЧМВ является процесс оцифровки какой-либо организацией архива (или поступающего потока) бумажных форм. В основе этого процесса находится ПО распознавания изображений (текста). В случае неудачи автоматического распознавания отсканированный образ может быть передан на одну из площадок организации МЧМВ (старейшей такой площадкой является Amazon Mechanical Turk [<http://mturk.com>]), где распознавание будет произведено людьми за определенное вознаграждение.

Один из наиболее успешных проектов по применению МЧМВ в научных исследованиях – Galaxy Zoo [<https://www.zooniverse.org/projects/zookeeper/galaxy-zoo/>] – посвящен классификации изображений галактик на снимках, полученных с телескопа. Проект оказался настолько успешным, что постепенно перерос в целую площадку так называемой «гражданской науки» (citizen science) Zooniverse [<https://www.zooniverse.org>], на которой на настоящий момент развернуты десятки проектов по обработке данных научных исследований (преимущественно в области астрономии и биологии) и зарегистрировано более 2 млн участников.

Ключевыми проблемами при практическом применении МЧМВ являются привлечение участников и обеспечение качества результатов. Так, привлечение участников связано с вопросами мотивации и стимулирования. В практических исследованиях выявляются разные виды мотивации участников таких си-

стем: внутренняя (альтруизм), внешняя (монетарная, социальный статус и пр.). Под качеством здесь понимается, в первую очередь, корректность, т.е. соответствие результата выполнения некоторой задачи (сбора или обработки информации) с помощью МЧМВ и «истинного» результата этой задачи (который, например, мог бы быть получен компетентным «экспертом», заинтересованным в выполнении данной задачи). Работы по обеспечению качества сосредоточены на способах распределения (назначения) работ среди участников и согласовании получаемых от них результатов [1]. Большинство существующих методов обеспечения качества в конечном итоге моделируют участника как некоторый «зашумленный» датчик, для которого характерен определенный профиль ошибок. Такая высокоуровневая модель оказывается в определенном смысле полезной. Например, с ее помощью можно оптимизировать параметры алгоритмов согласования и распределения заданий для достижения желаемого уровня уверенности в корректности (или точности) получаемого результата. Однако подобная модель, во-первых, игнорирует причины, по которым возникают те или иные профили ошибок, а во-вторых, обладает достаточно низкой предсказательной ценностью – с ее помощью невозможно предсказать, окажется ли определенный способ привлечения участников и обработки информации действенным, поскольку параметры модели могут быть оценены только в ходе практического использования системы человеко-машинных вычислений.

Одним из путей для преодоления этого ограничения является использование того факта, что человек, принимающий участие в процессе МЧМВ, в общем случае преследует свои цели (которые могут не совпадать с целями создателя системы). Явное включение этих целей в модель участника и понимание той роли, которую они играют в его поведении, позволяет более детально анализировать последствия тех или иных решений, принимаемых в ходе проектирования системы, использующей элементы МЧМВ.

Математическим аппаратом, с помощью которого может быть осуществлен учет «свободы выбора» участника, является теория игр. Возможные действия участника соответствуют

стратегиям, затраты усилий и получаемое вознаграждение определяют функцию полезности. Задача проектирования МЧМВ, таким образом, заключается в формировании такого механизма назначения вознаграждения, при котором для участника выгодной является стратегия, максимизирующая вероятность получения качественного решения.

Одной из первых попыток систематизировать результаты применения теории игр в МЧМВ является статья [14]. В этой статье намечены основные цели применения игровых моделей и, в частности, впервые звучат предложения о возможности разработки теории создания систем человеческих вычислений. С одной стороны, делается наблюдение о том, что такая теория по замыслу и целям очень похожа на раздел теории игр, посвященный дизайну механизмов распределения вознаграждения (mechanism design), с другой – подчеркивается отличие от рассматриваемой в области дизайна механизмов ситуации, в частности, предполагается отсутствие аналога принципа выявления (revelation principle) в этой области.

В данной статье изложены результаты обзора литературы, посвященной применению теоретико-игровых моделей для решения задач проектирования МЧМВ, с целью ответа на два основных вопроса:

1. Каковы допущения, используемые при теоретико-игровом моделировании МЧМВ?

2. Каковы основные виды моделей, применяемых при теоретико-игровом моделировании МЧМВ?

Очерчивая границы описанного в статье исследования, следует отметить следующее. В ряде работ отмечается, что данная область граничит с так называемыми «нехорошими» (англ. wicked) социо-техническими задачами [20], в которых агенты не имеют жестко заданного набора стратегий и множество возможных поведений является неизвестным. Соответственно, для таких задач может требоваться принципиально новый инструментарий. Кроме того, данный обзор посвящен моделям и методам, подходящим для проектирования системы с элементами МЧМВ, однако в ряде публикаций проводится анализ решения о том, стоит ли прибегать к решению задачи с помощью МЧМВ

(и стоит ли пытаться саботировать попытки конкурентов прибежать к МЧМВ). Наиболее яркой работой, где само решение о применении МЧМВ рассмотрено с точки зрения теории игр, является [19]. Не затрагиваются также работы, посвященные динамике сообщества, в том числе с применением эволюционных теоретико-игровых моделей [17].

В настоящее время существует большое количество вариантов организации МЧМВ (различающихся по способу распределения заданий, обработки результатов, используемым мотивам и пр.). По всей видимости, единой (иерархической) классификации систем МЧМВ не предложено, все существующие классификации основаны на выделении определенных отличительных аспектов подобных систем. Более того, каждый из конкретных вариантов организации МЧМВ может быть смоделирован различным образом (на разных уровнях, с различными допущениями), что порождает, во-первых, большое многообразие моделей, а во-вторых, сложность их иерархической классификации (по всей видимости, отсутствие единого, наиболее значимого, основания для такой классификации). В связи с этим в данной статье значительное место отведено основным аспектам МЧМВ, учитываемым при моделировании (каждый из которых может служить основанием классификации), типовым принимаемым допущениям и пр. Классификация же, использованная для структуризации раздела 2, имеет в большой степени практическую ориентацию.

Статья организована следующим образом:

В разделе 2 вкратце описаны основные классы систем МЧМВ, получившие наибольшее внимание при теоретико-игровом моделировании, пояснено их устройство и основные задачи, решаемые при проектировании (и теоретико-игровом моделировании).

В разделе 3 описаны основные «строительные блоки» теоретико-игровых моделей систем МЧМВ и основные решения, которые принимаются при построении теоретико-игровой модели такой системы. Таким образом, данный раздел в определенном смысле поясняет язык, используемый в остальной части статьи.

В разделе 4 обсуждаются конкретные модели для разных классов систем и результаты, полученные с помощью этих моделей.

2. Основные классы систем МЧМВ

Как уже отмечалось, идея использования интеллектуальных и творческих способностей человека при масштабной обработке информации оказалась достаточно востребованной и породила значительное количество частных технологий, отличающихся характером деятельности, выполняемой человеком в рамках системы, способом мотивации, видом применяемого вознаграждения, способом обработки результатов и рядом других параметров. Существует множество попыток классификации таких систем, в том числе на основе формальных языков (например, онтологий) [2]. Данная статья не претендует на общую классификацию МЧМВ – выделяемые здесь классы значимы, в первую очередь, с точки зрения их влияния на структуру теоретико-игровых моделей.

2.1. СОРЕВНОВАТЕЛЬНЫЕ МЧМВ (КОНКУРСЫ)

К данному типу относятся МЧМВ, в которых организатор (заказчик) объявляет открытый конкурс на решение задачи, а все (как правило) участники МЧМВ имеют возможность принять участие в этом конкурсе. Принятие участия в таком конкурсе означает, что участник решает предложенную задачу и отправляет решение организатору. Организатор, в свою очередь, проводит оценку решений и выбирает одно или несколько решений, авторы которых получают определенное заранее в условиях конкурса вознаграждение. Как правило, с помощью соревновательных МЧМВ решаются сложные задачи, требующие достаточно высокой квалификации участников и значительных усилий. Примерами применения соревновательных МЧМВ являются конкурсы по анализу данных и машинному обучению, проводимые Kaggle [<http://kaggle.com>], конкурсы на разработку ПО, проводимые TopCoder [<http://topcoder.com>], конкурсы инновационных идей Innocentive [<http://innocentive.com>], а также

многочисленные конкурсы (на создание рекламных роликов, слоганов и пр.), проводимые различными коммерческими компаниями.

Важными особенностями этого класса являются:

Свойства решения:

– сложное, качество может варьироваться в широких пределах;

– как правило, не комбинируется с другими.

Оценка решений:

– решения можно оценить (в значительной степени) объективно;

– организатор в состоянии обработать и оценить все полученные решения (и упорядочить их в соответствии с неким критерием).

Вознаграждение:

– как правило, денежное и достаточно большое (во всяком случае за победу).

Целью организатора подобных систем является создание такого механизма назначения вознаграждения, при котором будет получено наилучшее решение поставленной задачи.

Моделированию принятия решений участниками систем МЧМВ, основанных на применении соревновательных элементов, посвящены работы [3, 5, 12, 16].

2.2. СИСТЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ МИКРОЗАДАНИЙ

К данному типу относятся МЧМВ, в которых организатор публикует, как правило, достаточно большое количество однотипных заданий (микрозаданий), которые должны быть решены с помощью людей-участников среды МЧМВ. Распределение заданий между участниками может осуществляться либо централизованно (средой МЧМВ – например, на основе истории решения участником подобных заданий в прошлом), либо задания выбираются участниками из некоторого общедоступного пула. Участник выполняет задание, отправляет результат организатору и получает фиксированное вознаграждение, размер которого указан при выполнении задания. Как правило, микрозадания сами по себе достаточно простые (анализ изображения и поиск

на нем определенных объектов, классификация изображения и пр.) и их выполнение занимает не более нескольких минут. Организация выполнения микрозадач производится через такие площадки краудсорсинга как Amazon Mechanical Turk [<http://mturk.com>], Clickworkers [<http://clickworkers.com>], Яндекс.Толока [<http://toloka.yandex.ru>].

Важными особенностями этого класса являются:

Свойства решения:

- простое (набор слов, число, иногда просто «да/нет»);
- с точки зрения оценки качества часто либо правильное (допустимое), либо неправильное;
- комбинация решений зачастую не имеет смысла, поскольку для определенного задания есть только одно правильное решение (этот факт часто используется для перекрестной проверки присылаемых участниками решений).

Оценка решений:

- решения можно оценить объективно;
- организатор не в состоянии обработать и проверить все полученные решения.

Вознаграждение:

- как правило, денежное и очень небольшое (обычно до 100 руб.).

Данные особенности обуславливают специфические проблемы систем МЧМВ, основанных на выполнении микрозадач. Так, в силу невозможности проверки организатором всех поступивших решений (из-за их большого количества) исполнитель потенциально имеет возможность предоставить неудовлетворительное решение, надеясь получить за него вознаграждение (так называемый free-riding). Для противодействия этому вводятся различные механизмы обеспечения качества, основанные на введении определенной избыточности (одно задание назначается нескольким участникам, перекрестная проверка решений и пр.). С другой стороны, независимо от истинного качества решения участника организатору может оказаться выгодно заявить, что оно является недопустимым и, следовательно, отказаться от выплаты вознаграждения (так называемые «ложные жалобы», false reporting). Поскольку часто для борьбы

с этими эффектами используются схемы репутации, то сопутствующей задачей проектировщиков подобных систем является извлечение правдивой информации в рамках репутационных схем [6].

Моделированию принятия решений участниками систем МЧМВ, основанных на выполнении микрозаданий, посвящены работы [7, 25, 27].

2.3. СИСТЕМЫ СОВМЕСТНОГО СОЗДАНИЯ

В таких системах МЧМВ организатор публикует задание, доступное, как правило, большому количеству участников. В этом смысле системы совместного создания оказываются близки к соревновательным МЧМВ. Ключевое же отличие от систем соревновательного МЧМВ оказывается в том, что участники могут видеть результаты, предложенные другими участниками, в том числе они могут формировать решения на основе уже предложенных, обобщая и дополняя их. Сложность заданий в системах этого класса является промежуточной между соревновательными МЧМВ и системами микрозаданий: выполнение задания может занимать несколько часов и потребовать определенной квалификации. Примерами систем совместного создания являются Wikipedia [[http:// https://www.wikipedia.org/](http://https://www.wikipedia.org/)], различные форумы вопросов и ответов (StackOverflow [[http:// https://stackoverflow.com/](http://https://stackoverflow.com/)], Quora [<http://quora.com>] и др.). Типичной мотивацией в существующих системах совместного создания является альтруизм или социальный статус, однако это не обязательно.

Свойства решения:

- как правило, от нескольких абзацев до страницы текста;
- качество может варьироваться в достаточно широких пределах;
- комбинация решений может иметь смысл; как правило, она не может быть осуществлена механически, но вполне может быть осуществлена организатором или участником, подготавливающим собственное решение.

Оценка решений:

– в большинстве случаев качество решения можно оценить объективно (хотя на форумах вопросов и ответов встречаются субъективные вопросы, объективная оценка качества ответа на которые не всегда возможна);

– организатор видит все полученные решения и на основе их синтеза формирует собственное видение.

Вознаграждение:

– как правило, немонетарное либо отсутствует (альтруизм) или социальный статус.

Основная проблема при проектировании подобных систем состоит в формировании такого механизма распределения вознаграждения (в системе социального статуса – «значков», рейтинга, статусов), чтобы подтолкнуть участников к максимально активному участию (в смысле качества и оперативности вклада).

Моделированию принятия решений участниками систем совместного создания посвящены работы [8, 12, 13].

2.3. СИСТЕМЫ СБОРА ИНФОРМАЦИИ

В системах данного класса организатор формирует запрос на информацию определенного вида, а участники выражают готовность предоставить такую информацию на определенных условиях (как правило, участники могут назначить цену). Данный вид систем имеет очень много общих черт с системами выполнения микрозаданий и с системами совместного создания. Однако отличительным свойством, из-за которого оказывается целесообразно рассматривать такие системы отдельно, является «аддитивность» информации и акцент на количество собираемой информации, а не на достоверность (например, в силу того, что достоверность обеспечивается самим механизмом сбора).

Распространенными примерами систем сбора информации являются так называемые краудсенсинг (crowdsensing), в котором участники выступают как своеобразные «датчики» относительно простых сведений об окружающем мире, и participatory sensing, в котором участники просто предоставляют доступ центральному приложению к определенным ресурсам своих мобильных устройств [18, 22].

Свойства решения:

- как правило, простое: фотография, ответ на вопрос с фиксированным набором вариантов;
- качество зачастую гарантируется процессом сбора информации, если нет, то решение может быть правильным или нет (что легко установить);
- комбинация решений, как правило, может быть осуществлена механически (например, собранные данные могут быть наложены на карту с образованием слоя распределения измеряемого признака).

Оценка решений:

- качество решения можно оценить объективно;
- организатор видит все полученные решения, проверить он их не может, но обычно это и не требуется.

Вознаграждение:

- обычно монетарное (размер вознаграждения от малого (сотни рублей) до среднего (несколько тысяч рублей)).

Задача организатора такой системы – разработать такой механизм, который бы способствовал привлечению определенного количества участников, и обеспечению, в первую очередь, количественных параметров собираемой информации (с учетом затрачиваемых на сбор ресурсов).

Исследованию систем сбора информации посвящены работы: [17, 24].

2.4. ПРОЧИЕ СИСТЕМЫ

Так называемые «серьезные игры» (также «games with a purpose», GWAP) – класс систем МЧМВ, похожих на системы обработки микрозаданий. В частности, сходство это заключается в том, что предлагаемые участникам задания, как правило, являются простыми, могут быть легко проверены, однако их количество не позволяет организатору проверить все результаты, полученные от участников, поэтому проверка производится самими участниками на базе специальным образом сконструированной игровой механики. Отличие же заключается в том, что если традиционные микрозадания предполагают монетарное вознаграждение, то в GWAP основным мотивом для участника является получение удовольствия от игры (т.е. игровая механика).

ка должна быть привлекательной сама по себе). Основная цель, преследуемая при конструировании таких систем, состоит в том, чтобы разработать такую игровую механику, которая была бы привлекательной, но при этом поощряла поведение участника, способствующее достижению целей создателя игры (организатора). Теоретико-игровому анализу систем GWAР посвящена работа [9].

Особым классом систем МЧМВ являются так называемые рынки предсказаний (prediction markets). Суть их заключается в том, что участники (на основе имеющейся у них информации) делают ставку на то, что определенное событие произойдет в будущем, получая вознаграждение в том случае, если событие действительно происходит [23]. Соотношение сделанных ставок используется организатором для оценки вероятности события. Основными проблемами проектирования таких систем является разработка такого механизма распределения вознаграждений, чтобы стимулировать участника к правдивому предоставлению имеющейся у него информации о возможности события. Проблемам разработки таких механизмов посвящена, например, статья: [17].

Ключевые свойства основных классов систем МЧМВ, влияющих на структуру и допущения моделей, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Свойства основных классов систем МЧМВ

	Соревновательные МЧМВ	Системы выполнения микрозаданий	Системы совместного создания	Системы сбора информации
Свойства решения	– сложное; – не комбинируется.	– простое; – не комбинируется.	– средней сложности; – может комбинироваться.	– простое; – возможно механическое комбинирование; – часто корректность гарантируется.
Оценка решения	– возможна объективная оценка; – организатор может оценить все.	– возможна объективная оценка (верно/неверно); – организатор не может оценить все.	– возможна объективная оценка (как правило); – организатор может оценить и использовать все решения.	– возможна объективная оценка; – организатор может использовать все решения.

Таблица 1 (продолжение).

Вознаграждение	– денежное (большое).	– денежное (небольшое).	– альтруизм или социальный статус.	– денежное.
Цель заказчика (и механизма)	– получение наилучшего решения.	– получение корректных решений.	– активное долговременное участие.	– обеспечение количественных характеристик собираемой информации.

3. Элементы моделей систем МЧМВ

При построении теоретико-игровых моделей систем МЧМВ, как правило, принимается ряд существенных решений (и допущений) относительно моделируемой системы, а также характеристик и поведения ее участников. В данном разделе описаны основные из этих решений, которые, в сущности, определяют пространство возможных моделей МЧМВ. Совокупность таких решений задает структуру и свойства конкретной модели, а возможные варианты формируют своеобразный словарь для дискурса в области моделирования МЧМВ.

Участие в системе МЧМВ. При составлении модели сам факт участия человека в системе может считаться предопределенным, «экзогенным». В таких моделях заведомо предполагается, что в системе МЧМВ есть определенное количество участников и они принимают решения только о том, каких стратегий они будут придерживаться при выполнении заданий, но не о том, принимать им участие в работе системы или нет. В ряде же работ (например, [8]) предлагаются модели с так называемым «эндогенным» участием, т.е. такие, в которых само решение о принятии участия в функционировании системы МЧМВ является одним из рассматриваемых действий пользователя.

Виды агентов. В большинстве работ в модели рассматривается только выбор стратегии участником, однако существуют и специальные модели, агентами которых являются участник и организатор (как правило, такие модели используются при анализе механизмов, противодействующих одновременно и free-

riding (отправка участником заведомо низкокачественных результатов в надежде получить вознаграждение) и false-reporting (попытка организатора отвергнуть качественно выполненную работу, чтобы не выплачивать вознаграждение за нее)). В [19] агентом является организатор МЧМВ, который принимает решение о том, прибегать ли к услугам МЧМВ и пытаться ли саботировать МЧМВ, организованные конкурентами.

Возможные действия участника МЧМВ. С точки зрения рассматриваемых действий участника, целесообразно выделить «высокоуровневые» и «низкоуровневые» модели. Под высокоуровневыми моделями будем понимать такие, в которых множество действий моделируется только прилагаемыми участником усилиями, т.е. множество стратегий участника в игре задается просто диапазоном рассматриваемых усилий (например, «прилагать усилия» / «не прилагать усилия») – конкретные действия участника в модели не учитываются. Во многих моделях уровень усилий моделируется бинарно (например, [4, 25]), в других моделях (в особенности, в моделях, основанных на аукционах) – непрерывен (например, [12, 24]). Уровень усилий как стратегия участника присутствует в большинстве теоретико-игровых моделей МЧМВ, поскольку их основной целью является построение механизма, «заставляющего» участника системы выбирать максимальный уровень усилий. В ряде моделей (в первую очередь в системах выполнения микрозадач и при отсутствии соревновательности, когда достаточно получить некоторый допустимый результат, не обязательно наилучший или единственно верный) уровень усилий может моделироваться как вероятность принятия результата заказчиком [7].

В низкоуровневых моделях рассматривается набор действий, специфичных для определенного приложения. Например, в [11] аппарат теории игр применяется для моделирования соревновательного поведения на платформах краудсорсинга ПО TopCoder и стратегиями являются конкретные действия, которые могут совершить участники (атаковать решение соперника или не атаковать). Модель, предложенная в [13], предназначена для форумов и систем вопросов-ответов, и в ней решением является момент публикации известной участнику информации.

Особенно популярны низкоуровневые модели при анализе «серьезных игр» (GWAP) [9], набор возможных действий в этом случае определяется игровой механикой, а целью анализа является доказательство того, что рациональный участник будет предпринимать именно те действия, в которых заинтересован разработчик системы.

Компетентность участника. В ряде моделей МЧМВ учитывается гетерогенность участников по уровню умений (который может характеризоваться либо как затраты на получение определенного результата, либо как максимально возможный результат). В аукционных моделях, как правило, моделируется числом (см., например, [12, 24]), в некоторых моделях интерпретируется как вероятность, с которой данный участник может получить корректный результат [4]. Компетентность может моделироваться и бинарно, как выделение двух классов участников, обладающих схожими характеристиками («эксперт» и «новичок») [25]. В приведенных примерах описание компетентности является абстрактным, в ряде моделей применяется также прикладная («низкоуровневая») модель компетентности. Так, в моделях сбора информации компетентность иногда трактуется в теоретико-множественном смысле как знание некоторого множества фактов, имеющих отношение к задаче (например, [13, 17]).

Ряд работ основываются на гомогенности участников [7, 8, 26]. Предположение о гомогенности обычно обосновывается тем, что задания рассматриваемого типа могут быть выполнены любым или практически любым человеком (что часто бывает в случае микрозаданий).

Стоимость усилий участника. Как правило, просто задается для каждого уровня усилий (возможно, в зависимости от типа участника – например, как функция [12]).

Доступная для участника информация. При выборе стратегии участник может быть опираться на имеющуюся информации о свойствах (в первую очередь компетентности) других участников. Как правило, имеют место следующие допущения: отсутствие какой-либо информации о способностях других участников [25] или знание распределения компетентностей

[12]. Кроме непосредственно доступной участникам информации важным оказывается симметричность этой информации. В большинстве работ предполагается, что информация, которой обладают участники, симметрична. Редким исключением является статья [16], где анализ механизма основывается на асимметричности информации, которой обладают участники.

Бюджет организатора. Вопрос бюджета организатора оказывается важным в МЧМВ с монетарным вознаграждением. Он может не иметь значения (жестко задаваться механизмом) или не учитываться моделью (очень часто происходит именно так), наконец, он может учитываться моделью. В последнем случае возможны различные постановки: либо решается задача поиска механизма, обеспечивающего в равновесном состоянии нахождение решение должного качества с фиксированным бюджетом (например, [7]), либо минимизация бюджета. В частности, в ряде случаев стоимость для организатора рассматривается как один из критериев оценки механизма (см., [16, 26]).

С точки зрения принципиального устройства самих моделей, их можно разбить на две группы: «рефлексивные» (когда итоговая полезность участника зависит от действий других участников, что должно учитываться при выборе стратегии) и «нерефлексивные» (когда итоговая полезность зависит только от действий самого участника и параметров механизма).

Большинство описанных в литературе моделей относятся к первому типу, соответственно, их анализ сводится к поиску равновесных профилей стратегий (при определенном механизме). В свою очередь, такие модели могут быть симметричными (основанными на предположении, что зависимость полезности от усилий для разных участников одинакова) [7] и асимметричными [12, 16]. Основой анализа асимметричных моделей является понятие равновесия Байеса – Нэша.

Нерефлексивные модели, моделируются как «игры с природой». Например, подобная нерефлексивная модель предложена в статье [10] для системы сбора данных о доступности парковочных мест. Авторами предложена схема, стимулирующая участников приложения к сообщению правдивой информации о найденных местах, анализ же этой схемы основывается на

оценке полезности той или иной стратегии для участника приложения не только при определенных параметрах механизма, но и параметрах ситуации, в которой оказался участник.

4. Типовые модели разных классов систем МЧМВ

В данном подразделе описаны основные (базовые) модели для каждого из выделенных классов систем МЧМВ с учетом их особенностей. Представлены также основные направления развития базовых моделей, описанные в литературе.

4.1. СОРЕВНОВАТЕЛЬНЫЕ МЧМВ (КОНКУРСЫ)

При анализе МЧМВ соревновательного типа центральное место играют модели, основанные на аукционах. В частности, вслед за пионерской и широко цитируемой работой [5] – на аукционах, в которых «платят все» (all-pay auctions). Применение данной модели основывается на том, что организатор в состоянии, во-первых, оценить все решения, а во-вторых, ранжировать их в соответствии с предпочтительностью (или качеством в понимании организатора). Участники при этом получают вознаграждение в зависимости от позиции представленного ими решения в этом ранжированном списке. Цель, преследуемая организатором при проектировании такой системы, состоит в том, чтобы выбрать такой размер и механизм распределения вознаграждения, чтобы максимизировать качество либо наилучшего из полученных результатов, либо среднего.

Базовая модель для исследования таких систем задается следующим образом. Пусть N – количество игроков (участников МЧМВ), R – награда, которая предлагается за лучшее решение. Каждый участник характеризуется компетентностью, выражаемой как стоимость единицы усилий c_i . Ставки игроков соответствуют уровню усилий b_i , который участники прикладывают для выполнения конкурсного задания. Тогда в случае победы полезность игрока равна $R - c_i b_i$, а в случае поражения $-c_i b_i$.

В работе [5] базовая модель дополняется тем, что участнику доступно несколько конкурсов (с разным вознаграждением)

и сама игра состоит из двух этапов – на первом участник выбирает конкурс, а на втором – выбирает уровень усилий.

В работе [3] на базе концептуальной платформы аукционов, в которых «платят все», исследуется поведение чувствительных к риску участников в конкурсе с несколькими призами. В частности, в работе показано, что оптимальное распределение призового фонда среди победителей может существенно варьироваться в зависимости от склонности участников к риску: если участники нейтральны по отношению к риску, то механизмом, обеспечивающим наибольшую полезность для организатора, является назначение одного приза (только участнику, предложившему лучшее решение), а если участники не склонны к риску, то лучший результат можно получить, назначив вознаграждение участникам, предложившим несколько лучших решений.

В статье [16], в отличие от большинства других работ, рассматривается асимметричный конкурс (*asymmetric all-pay contest/auction*), в котором различаются не только типы участников (стоимости и возможности), но и их вероятностное знание относительно типов (других участников). Цель же состоит в том, чтобы разработать механизм распределения вознаграждения, показать уникальность равновесия и его эффективность. Авторы проводят исследование шести других механизмов и сопоставляют с предложенным. Рассматриваемая авторами модель – байесовская игра. Показано, что у предлагаемого авторами механизма есть одно равновесие по Байесу – Нэшу. Доказан также ряд свойств для разработанного механизма: автономность стратегии (поведение асимметричной модели схоже с поведением гомогенной симметричной), индивидуальная рациональность, мотивационная совместимость (*incentive compatibility* – доминирующей стратегией для участника является раскрытие его истинного типа).

В статье [21] предлагается оригинальная («низкоуровневая») модель использования краудсорсинга при проектировании, ее основой является конкурсная модель, в которой вознаграждение распределяется в соответствии с качеством решений, предоставляемых участниками. Однако «низкоуровневый» характер модели определяется тем, что вся задача моделируется как по-

иск экстремума некоторой функции (процесс разработки понимается как оптимизация качества результата за счет принятия проектных решений), а усилия участника моделируются как количество значений функции, которое участник мог узнать (за определенную плату). Авторы находят равновесия для разных постановок (с разными функциями выигрыша).

4.2. СИСТЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ МИКРОЗАДАНИЙ

При отсутствии соревновательности каждый участник, выполнивший задание и предоставивший удовлетворительный результат, получает вознаграждение. И здесь неизбежно возникает пара проблем: *free-riding* («проблема безбилетника») и *false-reporting* («проблема ложных жалоб»). Суть «проблемы безбилетника» состоит в том, что участник имеет определенный стимул для того, чтобы предоставлять низкокачественные результаты (получение которых не требует усилий или почти не требует усилий), рассчитывая, что они будут приняты и он получит вознаграждение. Значимость этой проблемы тем сильнее, чем ниже уверенность участника в том, что результат будет тщательно проверен и чем больше разнообразие заказчиков, предлагающих задания. Суть же проблемы ложных жалоб состоит в том, что, получив качественный результат, заказчик имеет определенный стимул для того, чтобы заявить, что результат якобы является некачественным с целью уклонения от уплаты вознаграждения.

Таким образом, основной целью при обеспечении качества в ЧМВ, организованных без соревновательности, является разработка таких механизмов распределения вознаграждения, которые бы решали две вышеназванные проблемы.

4.2.1. РЕПУТАЦИИ И СОЦИАЛЬНЫЕ НОРМЫ

Одним из основных подходов к решению проблем безбилетника и «ложных жалоб» являются механизмы, основанные на понятиях репутации и социальных норм. Основным инструментом для исследования подобных механизмов являются повторяющиеся игры, для поиска равновесных стратегий в которых используется принцип «однократного отклонения» (*one-time*

deviation). Общим ограничением для этого класса механизмов (и, соответственно, общим допущением, используемым в соответствующих аналитических моделях) является долговременный характер взаимодействия участника с платформой МЧМВ.

Так, в [27] – классической статье, посвященной этой проблеме, – предлагается концептуальная теоретико-игровая платформа для стимулирования участников систем МЧМВ. Ссылаясь на то, что в ситуациях, когда все участники преследуют свои собственные цели, всегда есть несоответствие в общественной пользе между равновесными стратегиями и желаемым Парето-оптимальным исходом, авторы предлагают класс протоколов стимулирования, основанный на социальных нормах, интегрирующих механизмы репутации в существующие схемы оценки заданий.

Вариант репутационной схемы также предлагается в [15]. Для анализа предложенного подхода авторы используют факт того, что долгосрочная полезность в повторяющейся игре начиная с определенного момента представляет собой дисконтированную сумму ожидаемой полезности за период на бесконечном горизонте планирования. То есть, вообще говоря, выбор стратегии – это марковский процесс принятия решений, где состояние – это рейтинг, а действие – это действие, совершаемое игроком. Оптимальная же стратегия должна удовлетворять принципу «однократного отклонения».

В [6] рассматривается проблема инфляции рейтингов на площадках краудсорсинга, т.е. ситуация, когда большинство исполнителей имеют высокие рейтинги, хотя проблемы с качеством все равно есть. Утверждается, что причиной этому является социальное давление, из-за которого люди избегают оставлять негативные отзывы. В качестве контрмеры авторы предлагают новую систему рейтинга, в которой последствия рейтинга более очевидны (участники, которым мы поставили высокий рейтинг, в будущем будут назначены с более высокой вероятностью для выполнения именно наших работ; заказчики, получившие от участника высокий рейтинг, будут в дальнейшем отображаться выше у него). То есть авторы решают проблему правдивого извлечения информации (рейтинга, оценки). Соот-

ветственно, свойство механизма, которое представляет для авторов наибольший интерес, – это мотивационная совместимость (обеспечивающее правдивое раскрытие приватной информации).

В статье [25] рассматривается проблема привлечения участников к решению задач на площадках краудсорсинга и мотивировать к получению результатов высокого качества (что жизненно важно, чтобы сделать систему краудсорсинга устойчивой). Для решения проблемы предложен эффективный механизм стимулирования и протокол репутации. Решение учитывает гетерогенность навыков (эксперты и новички), включает процесс назначения заданий, схему рейтингов и др. элементы. Механизм состоит из системы рейтингов и схемы распределения вознаграждения. Выведен минимальный уровень награды, позволяющий получать качественные решения от экспертов, и показано, что протокол репутации является эффективным при выявлении и предотвращении нежелательного поведения. Для анализа используется концептуальная платформа *повторяющихся игр (repeated games)*. Особенность именно в механизме назначения. В соответствии с моделью участник может быть экспертом или новичком и принимает два решения: может либо согласиться с выполнением задания, либо отказаться от него. А согласившись, может приложить либо высокие, либо низкие усилия. При этом участник не обладает априорной информацией о типах других участников. Предлагаемый механизм основан на бинарной рейтинговой системе и разделении вознаграждения. Заказчик платит всегда (что снимает проблему «ложных жалоб»).

4.2.2. МЕХАНИЗМЫ, НЕ ОСНОВАННЫЕ НА РЕПУТАЦИИ

Статья [26] посвящена поиску механизма для борьбы с проблемами монетарного краудсорсинга *free-riding* и *false-reporting*. Авторы подчеркивают, что жизнеспособность любого механизма, использующего схемы репутации, основывается на допущении, что все участники терпеливы и планируют оставаться в системе длительное время. В противовес предлагаются два механизма (с помощью третьей стороны и без помощи), основанные на аукционах (любом существующем двойном аукци-

оне) и резервировании вознаграждения, «размораживаемого» после получения обратной связи. С помощью модели определяются условия для размера резервируемого вознаграждения.

В статье [7] рассматривается краудсорсинг микрозаданий. Важным отличием от многих других работ является то, что учитывается ограниченность бюджета заказчика. Проводится анализ двух популярных механизмов (мажоритарного голосования и экспертной проверки) и на модели показывается их ограниченность при получении результатов высокого качества с низкой стоимостью. Предлагается также собственный механизм, в котором участникам, плохо показывающим себя, назначаются тренировочные задания (за счет этого повышаются долгосрочные показатели качества). Участники считаются одинаково способными и обладают одинаковой стоимостью приложения усилий. В качестве концепции исследования используется симметрическое равновесие по Нэшу.

В статье [4] предлагается и исследуется механизм извлечения суждений посредством МЧМВ, в котором участники выбирают уровень усилий и то, сообщать полученный результат или нет. Мотивирующим примером является перекрестная проверка в МООС. То есть участник должен ознакомиться с некоторой работой и принять решение о том, должна ли она быть зачтена. Таким образом, результат работы – это бинарное суждение. Рассматривается ситуация, когда достоверная оценка степени истинности этого суждения невозможна (все работы не проверяются экспертами). В статье предлагается механизм, обладающий следующими свойствами: 1) приложение участниками максимальных усилий и правдивое сообщение результатов оценки является равновесным по Нэшу; 2) это равновесие обеспечивает максимальный выигрыш всем агентам, вне зависимости от их реальных возможностей.

4.3. СИСТЕМЫ СОВМЕСТНОГО СОЗДАНИЯ

В [8] рассматривается вопрос построения механизмов стимулирования участников краудсорсинга с целью получения результатов высокого качества, при этом процесс участия считается эндогенным, т.е. является результатом стратегического выбо-

ра агента: агенты принимают два решения – об участии в ответе на вопрос и о прикладываемых усилиях. Задача построения механизма решается применительно к двум контекстам МЧМВ: создание контента (например, сервис вопросов и ответов), при котором роль вознаграждения играет внимание к ответу участника (соответственно, скрытие ответа эквивалентно отсутствию вознаграждения), и распределение фиксированного бюджета. Для анализа игры используется концепция симметрического равновесия по Нэшу. Показано, что для систем создания контента любая возрастающая статистика (максимум, среднее качество) улучшается, когда награда за каждое место, кроме последнего, максимальна. Для систем с фиксированным бюджетом показано, что плата за участие (каждый участник МЧМВ платит за допуск к конкурсу фиксированный взнос, который добавляется к вознаграждению победителя) позволяет повысить качество лучшего решения.

В [12] исследуются вопросы формирования виртуальных механизмов стимулирования (систем «бейджей») для максимизации общего вклада участников в веб-сайт, когда пользователи мотивированы социальным статусом. Рассматривается теоретико-игровая модель, в которой участник сайта прикладывает усилия (имеющие определенную стоимость) и вознаграждается с помощью различных бейджей (символов, демонстрирующих определенные заслуги участника и отображающихся в его профиле и/или в подписи всех сообщений данного участника). Ценность бейджа определяется количеством пользователей, обладающих таким же бейджем или бейджем с более высоким статусом. Показано, что среди всех возможных механизмов назначения вознаграждения оптимальный механизм – доска лидеров: пользователи с вкладом меньше определенного не получают ничего, остальные ранжируются по вкладу. Далее исследуются обязательные свойства механизмов, приближенных к оптимальному. В частности, установлено, что свойства этих механизмов зависят от выпуклости ценности статуса. Так, если статус оценивается вогнутой функцией, любой механизм должен содержать разбиение на группы, размер которых зависит от количества участников в системе. Если, наоборот, выпуклой, то

любой механизм должен включать набор групп фиксированного размера. Сама рассматриваемая модель очень похожа на аукцион, когда каждый из участников обладает определенной способностью (приватная информация, всем известно распределение), прилагает определенные усилия и делает вклад. В зависимости от (величины, качества) вклада, участники разбиваются на группы (соответствующие назначению бейджей). В этих условиях анализируются механизмы: с абсолютным порогом, доска лидеров, доска лидеров с отсечкой. В качестве концепции решения применяется равновесие по Байесу – Нэшу.

Особенностью форумов вопросов и ответов (Quora, StackOverflow, Вопросы Mail.ru) является то, что участники могут видеть ответы друг друга и дополнять их. В [13] предлагается теоретико-игровая модель сервиса вопросов и ответов, в которой каждый участник обладает некоторой информацией, касающейся вопроса, и делает стратегический выбор момента, когда он опубликует ответ, интегрировав все опубликованные к этому моменту ответы и свой. Задающий же вопрос может прервать процесс в любой момент. Целью авторов статьи является поиск механизмов поощрения, при которых участники были бы заинтересованы в том, чтобы дать ответ как можно быстрее.

4.4. СИСТЕМЫ СБОРА ИНФОРМАЦИИ

Системы сбора информации образуют отдельный класс приложений. Общая схема механизмов этой группы такая: участники объявляют цену своих услуг (в том числе неправдиво), распределяются задания, итоговый результат решения характеризуется суммой результатов, полученных от отдельных участников. Цели здесь могут быть разные – механизм, максимизирующий вклад, минимизирующий стоимость при заданном вкладе, а также дополнительные свойства типа *individual rationality*, *truthfulness* и пр. Существенное отличие от конкурсных моделей в том, что там участник делает ставку своим вкладом (*all-pay auction*), в то время как здесь он сначала оглашает условия, а потом получает назначение в зависимости от озвученных условий. В этом смысле механизмы оказываются близки

к классическим механизмам – речь идет о правдивости раскрытия приватной информации (о трудоемкости выполнения задания по сбору).

В [24] посвящена исследованию оптимального (для заказчика) механизма сбора информации по средством краудсорсинга. То есть механизма, который позволил бы заплатить минимальную сумму для того, чтобы получить суммарный итоговый результат требуемого (допустимого) качества. Не предполагается гомогенность участников. Рассматривается два механизма: механизм, основанный на экономном (frugal) аукционе и механизм, основанный на игре Штакельберга. Показано, что предложенные механизмы удовлетворяют ряду полезных свойств и добавляют не более ограниченной суммы к оптимальному механизму, построенному без мотивации.

4.5. ДРУГИЕ СИСТЕМЫ

При рациональном проектировании так называемых «игр с целью» (GWAP) решается несколько другой круг проблем. Здесь речь идет о построении механизмов обеспечения качества (действующими лицами которых являются участники системы – как правило, речь идет о взаимной верификации), демонстрирующих желаемые свойства. Модель участника в GWAP минимальна, т.е. делается минимум допущений (пожалуй, кроме рациональности) и реальным объектом исследования являются правила GWAP. Статья [9] является одной из первых (или даже первой) статей, в которой осуществляется попытка теоретико-игрового анализа системы человеко-машинных вычислений. В частности, речь идет о GWAP PhotoSlap – приложении для семантической аннотации изображений. Авторы проводят теоретико-игровой анализ этих правил и показывают, что стратегический игрок действительно будет действовать так, как выгодно организаторам игры (в соответствии с «целевой стратегией»).

Даже в системах выполнения микрозаданий не все сводится к противоборству free-riding и false-reporting. В некоторых приложениях, где заданий мало, участников много и много участников выполняют одно задание, а истинный результат является

наблюдаемым, нет ни free-riding, ни false-reporting, потому что от платежа уклониться невозможно, а смысл во free-riding отсутствует, поскольку вознаграждение получает только давший истинный результат (который становится доступен всем). Подобная организация имеет очень много общего с конкурсами, только в конкурсе участники соревнуются в том, кто предложит вариант с лучшим качеством, а тут соревнуются в том, кто окажется ближе к истинному результату.

Основные подходы сведены в таблицу 2. Для каждого указан класс МЧМВ (определяющий основные задачи модели), свойства игроков (информация, которой обладают стороны, а также указание на то, являются ли они гомогенными – предполагает ли модель, что у всех участников одинаковые значения соответствующих характеристик), стратегии, а также некоторые особенности модели (используемая концепция равновесия, назначение и пр.). В некоторых случаях свойства игроков не указаны. Это означает, что для соответствующей модели данный аспект не принципиален и авторы не указывают свойства явно. Если не указано иное, то множеством игроков в модели является множество участников (выполняющих задания). В тех редких случаях, когда это не так, в таблице указаны стратегии для каждого вида игроков.

Таблица 2. Сводная таблица по теоретико-игровым моделям

Статья, год	Класс МЧМВ	Свойства игроков	Стратегии	Особенности модели
[5] 2009	Конкурс	Уровень умений (для каждого конкурса)	Выбор конкурса, выбор уровня усилий	Симметрическое равновесие по Байесу – Нэшу
[3] 2009	Конкурс	Уровень умений	Выбор уровня усилий	Симметрическое равновесие. Рассматриваются различные склонности участников к риску
[16] 2016	Конкурс	Уровень умений	Выбор уровня усилий	Асимметричный аукцион
[21] 2015	Конкурс	Гомогенность в смысле опыта и знаний	Выбор уровня усилий	Равновесие по Нэшу
[27] 2012	Микрозадания	Гомогенность. Индивидуальный рейтинг (назначается механизмом)	Уровень усилий (бинарный)	Повторяющиеся игры, принцип однократного отклонения
[15] 2017	Микрозадания	–	Этап 1: Прибегать ли к краудсорсингу Этап 2: Атаковать ли конкурента	Повторяющиеся игры, принцип однократного отклонения
[6] 2016	Микрозадания	–	Оценка работы (ее соответствие действительному качеству выполненной работы)	Предлагается механизм, обеспечивающий правдивое раскрытие информации о качестве выполненной работы. Повторяющиеся игры
[25] 2014	Микрозадания	Гетерогенные (2 уровня – эксперты и новички)	Отказ от выполнения задания, уровень усилий (бинарный)	Равновесие в чистых стратегиях (без механизма репутации). Повторяющиеся игры

Таблица 2 (продолжение).

[26] 2015	Микрозадания	Заказчик: ценность задания Участник: затраты на выполнение задания	Заказчик: принять или не принять Участник: выполнить или не выполнить	Игра в расширенной форме: принятие решения об участии, решение и оценка. Равновесие, совершенное по подыграм
[7] 2015	Микрозадания	Гомогенность	Качество решения (вероятность того, что оно будет принято)	Симметрическая игра (все остальные участники действуют одинаково). Симметрическое равновесие по Нэшу
[4] 2013	Микрозадания	Вероятность правильной оценки работы при приложении усилий	Уровень усилий при проверке работы (бинарный), правдивость раскрытия суждения	Равновесие по Нэшу
[8] 2012	Совместное создание	Гомогенность. Функция стоимости прикладываемых усилий	Участие, уровень прикладываемых усилий	Симметрическое равновесие по Нэшу
[12] 2015	Совместное создание	Способность (определяет затраты на приложение усилий)	Уровень усилий	Вознаграждение с помощью бейджей (социальный статус). Равновесие по Байесу – Нэшу
[13] 2009	Совместное создание	Обладание некоторым фрагментом информации о проблеме	Момент раскрытия имеющейся информации (интеграции ее в имеющийся ответ)	Равновесие по Нэшу в чистых стратегиях
[24] 2017	Сбор информации	Потенциальная ценность вклада, трудоемкость	Уровень усилий (вещественный, от 0 до 1), декларация потенциальной ценности вклада и трудоемкости	Выбор механизма, обеспечивающего правдивое раскрытие информации. Равновесие по Нэшу
[9] 2007	GWAP	–	Внутриигровые действия (определяемые механикой игры)	Равновесие, совершенное по подыграм

5. Заключение

В статье представлены результаты обзора в области применения теоретико-игровых моделей для рационального проектирования систем, использующих МЧМВ. В частности, на основе проведенного исследования выявлены допущения, используемые при теоретико-игровом моделировании таких систем, и основные классы моделей. Полученные результаты сгруппированы в соответствии с типологией систем МЧМВ, показано, какие допущения, цели моделирования и виды моделей характерны для каждого выделенного вида таких систем.

Важнейшим аспектом является процесс валидации разрабатываемых моделей, так как зачастую модели достаточно абстрактны, а определение функций полезности участников основывается на достаточно значительном перечне допущений (хорошим руководством по проблеме валидации является статья [21]). При составлении обзора отмечено по крайней мере два способа валидации моделей: 1) сопоставление предсказаний модели с реальным поведением участников краудсорсинговой площадки [5]; 2) проведение поведенческих экспериментов, демонстрирующих эффективность разработанного механизма [7, 21]. Анализ же моделей проводится как аналитически [10], так и с помощью имитационного моделирования [15, 17, 24, 27] (подавляющее большинство работ).

Следует отметить, что при составлении обзора автору не встретилось попыток использовать элементы поведенческой теории игр при проектировании МЧМВ, что создает определенные перспективы для новых исследований в этой области.

В целом проведенный обзор демонстрирует, что некоторые разделы теории игр не только могут использоваться для рационального проектирования систем МЧМВ, но и активно применяются для этой цели. Тем не менее существует определенный «зазор» между теорией и практикой, и автор надеется, что данная статья послужит устранению этого «зазора».

Литература

1. ПОНОМАРЕВ А.В. *Методы обеспечения качества в системах крауд-вычислений: аналитический обзор* // Труды СПИИРАН. – 2017. – №5(54). – С. 152–184.
2. ПОНОМАРЕВ А.В. *Онтология для описания приложений, использующих элементы крауд-вычислений* // Кибернетика и программирование. – 2018. – №3. – С. 25–37.
3. ARCHAK N., SUNDARARAJAN A. *Optimal Design of Crowdsourcing Contests* // Proc. of the Int. Conf. on Information Systems – ICIS 2009. – Article 200. – P. 1–16.
4. DASGUPTA A., GHOSH A. *Crowdsourced judgement elicitation with endogenous proficiency* // Proc. of the 22nd Int. Conf. on World Wide Web – WWW'13. – 2013. – P. 319–330.
5. DIPALANTINO D., VOJNOVIC M. *Crowdsourcing and all-pay auctions*. – New York, New York, USA: ACM Press, 2009. – P. 119–128.
6. GAIKWAD S. (NEIL) S. et al. *Boomerang: Rebounding the Consequences of Reputation Feedback on Crowdsourcing Platforms* // Proc. of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology. – 2016. – P. 625–637.
7. GAO Y., CHEN Y., LIU K.J.R. *On Cost-Effective Incentive Mechanisms in Microtask Crowdsourcing* // IEEE Trans. on Computational Intelligence and AI in Games. – 2015. – No. 1(7). – P. 3–15.
8. GHOSH A., MCAFEE P. *Crowdsourcing with endogenous entry*. – New York, New York, USA: ACM Press, 2012. – 999 p.
9. HO C.-J., CHANG T., HSU J.Y. *Photoslap: A multi-player online game for semantic annotation* // Proc. of the 22nd National Conf. on Artificial intelligence. – 2007. – Vol. 2. – P. 1359–1364.
10. НОИ В. et al. *TruCentive: A game-theoretic incentive platform for trustworthy mobile crowdsourcing parking services* // Proc. of the IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC-2012). – P. 160–166.

11. HU Z., WU W. *A Game Theoretic Model of Software Crowdsourcing* // Proc. of the IEEE 8th Int. Symposium on Service Oriented System Engineering. – IEEE, 2014. – P. 446–453.
12. IMMORLICA N., STODDARD G., SYRGKANIS V. *Social Status and Badge Design*. – New York, New York, USA: ACM Press, 2015. – P. 473–483.
13. JAIN S., CHEN Y., PARKES D.C. *Designing incentives for online question and answer forums* // Proc. of the 10th ACM Conf. on Electronic Commerce. – 2009. – P. 129–138.
14. JAIN S., PARKES D.C. *The role of game theory in human computation systems* // Proc. of the ACM SIGKDD Workshop on Human Computation. – 2009. – P. 58–61.
15. LU J. et al. *Designing Socially-Optimal Rating Protocols for Crowdsourcing Contest Dilemma* // IEEE Trans. on Information Forensics and Security. – 2017. – No. 6(12). – P. 1330–1344.
16. LUO T. et al. *Incentive Mechanism Design for Heterogeneous Crowdsourcing Using All-Pay Contests* // IEEE Trans. on Mobile Computing. – 2016. – No. 9(15). – P. 2234–2246.
17. MANN R.P., HELBING D. *Optimal incentives for collective intelligence* // Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2017. – No. 20(114). – P. 5077–5082.
18. MERLINO G. et al. *Mobile crowdsensing as a service: A platform for applications on top of sensing Clouds* // Future Generation Computer Systems. – 2016. – Vol. 56. – P. 623–639.
19. NARODITSKIY V. et al. *Crowdsourcing contest dilemma* // Journal of the Royal Society Interface. – 2014. – No. 99(11).
20. RITTEL H.W.J., WEBBER M.M. *Dilemmas in a general theory of planning* // Policy Sciences. – 1973. – No. 2(4). – P. 155–169.
21. SHA Z., KANNAN K.N., PANCHAL J.H. *Behavioral Experimentation and Game Theory in Engineering Systems Design* // Journal of Mechanical Design. – 2015. – No. 5(137). – Article 051405.
22. SHIN D. et al. *Urban sensing: Using smartphones for transportation mode classification* // Computers, Environment and Urban Systems. – 2015. – Vol. 53. – P. 76–86.

23. WOLFERS J., ZITZEWITZ E. *Prediction Markets* // Journal of Economic Perspectives. – 2004. – No. 2(18). – P. 107–126.
24. WU W. et al. *Incentive mechanism design to meet task criteria in crowdsourcing: How to determine your budget* // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2017. – No. 2(35). – P. 502–516.
25. XIE H. et al. *Incentive mechanism and protocol design for crowdsourcing systems* // 52nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Allerton, 2014. – 2014. – P. 140–147.
26. ZHANG X. et al. *Keep Your Promise: Mechanism Design Against Free-Riding and False-Reporting in Crowdsourcing* // IEEE Internet of Things Journal. – 2015. – No. 6(2). – P. 562–572.
27. ZHANG Y., SCHAAR M. VAN DER *Reputation-based incentive protocols in crowdsourcing applications* // Proc. of the 2012 IEEE INFOCOM. – 2012. – P. 2140–2148.

APPLICATION OF GAME-THEORETIC METHODS AND MODELS TO THE DESIGN OF LARGE-SCALE HUMAN-MACHINE COMPUTING SYSTEMS

Andrew Ponomarev, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St.Petersburg, Cand.Sc., senior researcher (ponomarev@iias.spb.su).

Abstract: Systems using elements of large-scale human-machine information processing (crowdsourcing, crowd computing) have recently become popular in solving a number of practical problems. One of the main problems associated with the use of human-machine computing is the quality of the results obtained in this way. A promising approach to the design of such systems is the use of game-theoretic modeling of the situation (system participant and method of reward distribution), to ensure that the method of reward distribution contributes to the participant applying maximum efforts and, accordingly, achieving the goals of the system designer. The paper presents the results of a review in the field of application of game-theoretic models for the rational design of systems employing large-scale human-machine computing. In particular, assumptions used in game-theoretic modeling of such systems and the main classes of models are identified. The obtained results are grouped in accordance with the typology of large-scale human-machine computing systems; the paper shows what assumptions, modeling goals, and types of models

*Управление техническими системами
и технологическими процессами*

are typical for each distinguished type of such systems. The review may be useful both to practitioners who are constructing software systems that include elements of large-scale human-machine computing, and to researchers working in this field.

Keywords: crowd computing, crowdsourcing, collective intelligence, human-machine systems, game theory, mechanism design, auction theory.

УДК 021.8 + 025.1

ББК 78.34

DOI: 10.25728/ubs.2021.89.3

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Я.И. Квинто.*

Поступила в редакцию 02.07.2020.

Опубликована 31.01.2021.