

Е.К. СЕМЕНЕНКО, А.Г. БЕЛОЛИПЕЦКАЯ, Р.Н. ЮРЬЕВ, А.П. АЛОДЖАНЦ,
И.А. БЕССМЕРТНЫЙ, И.А. СУРОВ

**ВЫЯВЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СГОВОРОВ МЕТРИКАМИ
КВАНТОВОЙ ЗАПУТАННОСТИ**

Семенов Е.К., Белоліпецкая А.Г., Юрьев Р.Н., Алоджанц А.П., Бессмертный И.А., Суров И.А. Выявление экономических сговоров метриками квантовой запутанности.

Аннотация. Эффективность экономики обусловлена оперативностью пресечения незаконного поведения хозяйствующих субъектов. В условиях ускорения деловой активности важной частью данного условия становится выявление рыночных сговоров на основе статистики электронных следов. В статье представлено решение этой задачи на основе кванто-теоретического подхода к моделированию принятия решений. А именно, когнитивные состояния субъектов представляются комплекснозначными векторами в пространстве, образованном базисными поведенческими альтернативами, тогда как вероятности принятия решений определяются проекциями этих состояний на соответствующие направления. Согласованность многостороннего поведения при этом соответствует запутанности порождающего когнитивного состояния, степень которой измеряется стандартными кванто-теоретическими метриками. Высокое значение метрики свидетельствует о вероятном наличии сговора между рассматриваемыми субъектами. Полученный таким образом метод выявления поведенческой координации апробирован на открытых данных об участии юридических лиц в государственных закупках за период с 2015 по 2020 годы, доступных на федеральном портале <https://zakupki.gov.ru>. Для использованной выборки построены квантовые модели примерно 80 тысяч уникальных пар и 10 миллионов уникальных троек ИНН. Достоверность выявления сговоров определялась сравнением подозреваемых с открытыми данными Федеральной антимонопольной службы <https://br.fas.gov.ru>. Согласно полученным функциям ошибок, половина известных парных сговоров выявляется с достоверностью более 50%, что сравнимо с методами выявления на основе классической корреляции и классической взаимной информации. В трёхстороннем случае, напротив, квантовая модель оказывается практически безальтернативной в силу ограниченности классических метрик двусторонней корреляцией. Половина таких сговоров выявляется с достоверностью 40%. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности кванто-вероятностного подхода к моделированию многостороннего экономического поведения. Разработанные метрики могут быть использованы в качестве информативных признаков для аналитических систем и алгоритмов машинного обучения подобной направленности.

Ключевые слова: сговор, картель, принятие решений, квантовая вероятность, квантовая запутанность, поведенческое моделирование, рекомендательные системы.

1. Введение. Машинный анализ данных с целью обеспечения правопорядка является актуальной областью прикладных исследований. Он используется для выявления прошлых и прогнозирования будущих актов противоправного поведения на основе анализа разнородных поведенческих данных, включая информацию в социальных сетях, финансовые транзакции и др. [1 – 4]. Одна из таких задач – выявление незаконных сговоров между субъектами экономической деятельности, в том числе между участниками государственных закупок товаров и услуг, опубликованных в единой информационной системе <https://zakupki.gov.ru>; таким образом закупаются, например, лекарства и оборудование, услуги Интернет, телефонии и ЖКХ, строительства и ремонта и т.д. В целях повышения прибыли недобросовестные подрядчики договариваются о согласованном поведении на торгах, вследствие чего товар или услуга приобретает из бюджетных средств по завышенной цене.

Такое поведение хозяйствующих субъектов – называемое *сговором* или *картелем* – незаконно и преследуется по статьям административного и уголовного кодексов РФ [5]. Для сокрытия своих действий правонарушители привлекают к торгам подставных участников, которые играют по заранее распределённым ролям для создания видимости конкуренции. Выявление сложных схем согласованного поведения представляет большую практическую проблему, которая обостряется с ускорением экономической активности [6]. Растущая скорость транзакций в электронной среде превышает возможности ручной обработки, которые, однако, расширяются с помощью машинных средств.

Первая модель автоматического выявления сговоров, также известная как эконометрический скрининг, была предложена в 2003 г. [7]. Эта модель позволяет рассчитать естественное, конкурентно-рыночное распределение заявок, систематические отклонения от которого являются признаками недобросовестного поведения. Недостатком модели является необходимость знания экономических параметров участников торгов, многие из которых представляют собой коммерческую тайну. В результате большая часть необходимых данных должна дополнительно определяться отраслевыми экспертами, что приводит к потере точности. Аналогичный подход [8] использует анализ аномальных дисперсий в распределении заявок, предполагая, что они следуют равномерному распределению.

В последние годы разработан ряд методов выявления сговоров на основе машинного обучения. В первом исследовании такого типа [9] создан классификатор заявок по наличию либо отсутствию сговора на

строительстве швейцарских железных дорог. С четырьмя достоверно установленными картелями, на малой выборке из 584 торгов правильно классифицированы 84% из 3799 заявок. Широкое исследование методов машинного обучения проведено для больших массивов данных о торгах из пяти стран [10]. Усреднённая по странам сбалансированная точность 11 рассмотренных алгоритмов находится в диапазоне от 48% до 86%.

Недостатком большинства известных подходов является их ограниченность двусторонним поведением, т.е. рассмотрением только сговоров между двумя субъектами поведения. Помимо наибольшей простоты, основанием для этой ограниченности служит неявное предположение о том, что многосторонние связи сводятся к комбинации двусторонних. Соответственно, классические монографии по статистике, психометрике, экономике и социологии [11 – 14] рассматривают двусторонний случай как единственно заслуживающий внимания.

В реальной практике социальных взаимодействий, однако, для такого допущения оснований нет [15 – 18]; напротив, установлено, что в качестве единицы межсубъектных отношения более оправдано рассмотрение не пар, а троек индивидов [19, 20]. В парадигме машинного обучения эта задача может быть решена аналогично двустороннему случаю, когда признаками классифицируемого объекта являются параметры многостороннего поведения [21]. Нахождение наиболее информативных параметров такого поведения, однако, есть теоретическая задача, требующая отдельного решения.

Недостаточность классической статистики в этом отношении указывает на актуальность рассмотрения альтернативных подходов к поведенческому моделированию. В настоящей работе в качестве такового исследуется развитый в последние десятилетия подход на основе квантовой теории. Среди других направлений социофизики [22 – 24], этот подход выделяется удобством моделирования связанного поведения, играющего ключевую роль в динамике социальных систем [25]. Это свойство позволяет, в частности, описывать коллективное принятие решений [26, 30], неклассические равновесия в играх [27–29, 31, 32], иррациональную динамику финансовых рынков [33 – 40], коллективные социальные возбуждения [41 – 43], и др. [44, 46 – 48]. При этом, согласованность принятия индивидуальных решений соответствует свойству *запутанности* многочастичных квантовых систем, не имеющему аналога в классических поведенческих моделях.

В настоящей статье квантовая теория вероятности использована для выявления экономических сговоров. Развивая намеченный ранее подход [6], в разделе 2 представлена соответствующая модель

многостороннего поведения, на основе которой построен ряд квантово-теоретических метрик поведенческой согласованности. В разделе 3 описана методика эксперимента по апробации модели на открытых данных об участии юридических лиц в государственных закупках. В разделе 4 представлены результаты эксперимента, включая достоверность выявления сговоров и сравнение квантово-теоретических метрик корреляции с существующими классическими аналогами. В разделе 5 обсуждаются перспективные направления развития представленного подхода.

2. Теория

2.1. Принципы поведенческого моделирования на основе квантовой теории. В соответствии с принципами квантового моделирования [49], когнитивное состояние субъекта данной поведенческой неопределённости представляется нормированным вектором $|\psi\rangle$ в комплекснозначном (Гильбертовом) пространстве \mathcal{H} . Базис пространства образован ортонормированными векторами:

$$|1\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad |2\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \dots \quad |N\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

соответствующими N альтернативным взаимоисключающим вариантам поведения. Квантово-когнитивное состояние субъекта тогда описывается вектором:

$$|\psi\rangle = \sum_{i=k}^N \gamma_k |k\rangle = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_N \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где комплекснозначные компоненты разложения γ_k называются также *амплитудами* (вероятности). Эти амплитуды можно представить в виде скалярного произведения $\gamma_k = \langle k|\psi\rangle$, где вектор-строка $\langle k|$ есть комплексно-сопряжённая транспозиция вектор-столбца $|k\rangle$. Квадрат модуля этой величины определяет вероятность осуществления соответствующей поведенческой альтернативы:

$$|\langle k|\psi\rangle|^2 = |\gamma_k|^2 = p_k, \quad k = 1 \dots N. \quad (3)$$

Соответственно, нормировка:

$$\langle \psi | \psi \rangle = [\gamma_1^* \quad \gamma_2^* \quad \dots \quad \gamma_N^*] \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_N \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N p_k = 1, \quad (4)$$

выражает полноту базисной системы поведенческих альтернатив.

Классическая и квантовая неопределённость. Состояние (2) коренным образом отличается от нормированного распределения вероятности $[p_1, p_2, \dots, p_N]$, описывающего неопределённость наблюдаемых величин в классической теории вероятности Колмогорова. Распределения этого типа описывают незнание величины, объективно находящейся в одном из N состояний. В случае $N = 2$ примером такой ситуации является незнание человеком того, какой стороной вверх лежит монета под салфеткой. Эта *субъективная* неопределённость снимается измерением, не меняющим объективное состояние величины.

Вектор состояния (2), напротив, описывает состояние неустранимой неопределённости, когда величина ещё не находится ни в одном из базисных состояний. В отличие от неопределённости, обусловленной ограниченной информированностью субъекта как описано выше, данная неопределённость носит *объективный* характер. Информацию о её значении можно получить только путём эксперимента, приводящего величину в одно из N базисных состояний [50, 51].

В поведенческих процессах таким экспериментом является каждый акт принятия решения – свободный выбор человека, не обусловленный объективными факторами. Алгоритмически не предопределённый, спонтанный характер таких решений относит поведенческие неопределённости в рассматриваемой задаче к квантовому типу [52, 53]. Как и в физике, соответствующие статистические закономерности моделируются с помощью линейной алгебры вектор-состояний в комплекснозначных (Гильбертовых) пространствах как описано выше.

2.2. Модель принятия многосторонних двухвариантных решений. В рассматриваемой задаче субъектом поведения является группа из K юридических лиц, принимающих решение относительно участия «1» либо неучастия «0» государственном тендере на поставку товаров, оказание услуг или выполнение работ по заранее объявленным в документации условиям (далее торг). В результате имеет место $N = 2^K$ взаимоисключающих поведенческих альтернатив, одна из которых

осуществляется в процессе принятия решения. Эти альтернативы кодируются последовательностями нулей и единиц. Базисное состояние $|10\rangle$, например, соответствует случаю, когда из $K = 2$ лиц A и B участие в торге приняло только лицо A . Согласно первой части выражения (2) общий вид когнитивного состояния такой группы описывается вектором:

$$|\psi_{AB}\rangle = \gamma_{00}|00\rangle + \gamma_{01}|01\rangle + \gamma_{10}|10\rangle + \gamma_{11}|11\rangle, \quad (5)$$

нормировка (4) которого требует:

$$\sum_{a,b} p_{ab} = \sum_{a,b} |\gamma_{ab}|^2 = 1.$$

Аналогично, когнитивное состояние группы из трёх лиц A , B , C описывается вектором:

$$|\psi_{ABC}\rangle = \sum_{a,b,c} \gamma_{abc}|abc\rangle, \quad \sum_{a,b,c} |\gamma_{abc}|^2 = 1. \quad (6)$$

Как отмечено во введении, эти два случая $K = 2$ и $K = 3$ представляют наибольший практический интерес.

Комплекснозначные амплитуды γ удобно представить в виде модулей r и фазовых множителей $e^{i\phi}$ как:

$$\gamma = r e^{i\phi}, \quad r \in [0, 1], \quad \phi \in [0, 2\pi). \quad (7)$$

Согласно (3), модули однозначно определяются вероятностями принимаемых решений, так что для случая $K = 2$:

$$r_{ab} = \sqrt{p_{ab}}, \quad p_{ab} = \frac{n_{ab}}{n}, \quad (8)$$

где n_{ab} есть число решений « ab », а $n = \sum n_{ab}$ - полное число решений в имеющихся данных. Фазы ϕ_{ab} , напротив, являются свободными параметрами, составляющими особенность квантовой модели.

2.3. Метрики двусторонней согласованности. Согласованность частей системы при разрешении неопределённости квантового типа известна в физике как феномен квантовой запутанности [54]. В рассматриваемой задаче запутанность выражается в согласованном принятии решений юридическими лицами, являющимися частями распределенной поведенческой системы.

Запутанность двухчастичного (двустороннего) состояния (5) выражается в невозможности представить его в виде произведения:

$$\begin{aligned} |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle &= \\ &= (\alpha_0|0_A\rangle + \alpha_1|1_A\rangle) \otimes (\beta_0|0_B\rangle + \beta_1|1_B\rangle) = \\ &= \alpha_0\beta_0|00\rangle + \alpha_0\beta_1|01\rangle + \alpha_1\beta_0|10\rangle + \alpha_1\beta_1|11\rangle, \end{aligned} \quad (9)$$

где $|\psi_A\rangle$ и $|\psi_B\rangle$ есть индивидуальные когнитивные состояния лиц A и B . Соответственно, мерой запутанности является величина:

$$Q_{AB} = 2 |\gamma_{11}\gamma_{00} - \gamma_{01}\gamma_{10}|, \quad 0 \leq Q \leq 1, \quad (10)$$

называемая *конкурентс*¹ [55]. Конкурентс обращается в ноль для факторизуемых состояний (9), соответствующих несогласованному поведению субъектов A и B , т.е. независимости их решений. Наибольшее значение, равное единице, достигается для максимально запутанных состояний:

$$\frac{|00\rangle + e^{i\phi}|11\rangle}{\sqrt{2}}, \quad \frac{|01\rangle + e^{i\phi}|10\rangle}{\sqrt{2}},$$

описывающих максимальную согласованность (корреляцию и антикорреляцию) двусторонних решений, моделируемую в рамках квантовой теории.

Соотношения (7) и (8) позволяют выразить величину (10) через наблюдаемые вероятности p_{ab} :

$$\begin{aligned} Q_{AB} &= 2\sqrt{p_{00}p_{11} + p_{01}p_{10} - 2\sqrt{p_{00}p_{01}p_{10}p_{11}} \cos \Delta}, \\ \Delta &= \phi_{00} + \phi_{11} - \phi_{10} - \phi_{01}, \end{aligned} \quad (11)$$

где параметр Δ определяет влияние фазовых параметров исходного состояния (5) на значение Q_{AB} . Данная форма метрики конкурентс наиболее удобна для практического использования.

¹В квантовой информатике используются и другие меры двухчастичной запутанности, в частности запутанность формирования [58], (логарифмическая) отрицательность [59] и энтропия (взаимная информация) фон-Неймана [60]. Для рассматриваемой задачи отличие этих величин от конкурентс [61, 62] незначительно.

Классическими аналогами конкуренса (11) является модуль коэффициента сопряженности [11]:

$$C_{AB} = \left| \frac{p_{00}p_{11} - p_{01}p_{10}}{\sqrt{(p_{00} + p_{01})(p_{00} + p_{10})(p_{11} + p_{10})(p_{11} + p_{01})}} \right|, \quad (12)$$

$$0 \leq C \leq 1$$

и взаимная информация [63]:

$$I_c = \sum_{a,b} p_{ab} \log \frac{p_{ab}}{p_a p_b} > 0, \quad (13)$$

где $p_i = \sum_j p_{ij}$ есть маргинальные распределения двухчастичной вероятности p_{ab} . Как и в случае конкуренса, наименьшие и наибольшие значения этих метрик означают отсутствие корреляции и наиболее сильную корреляцию, двустороннего поведения, соответственно.

2.4. Метрики трёхсторонней согласованности. Для измерения согласованности трёхстороннего поведения была использована стандартная метрика трёхчастичной запутанности [64]:

$$\tau = 4 |d_1 - 2d_2 + 4d_3|, \quad (14)$$

где:

$$\begin{aligned} d_1 &= \gamma_{000}^2 \gamma_{111}^2 + \gamma_{001}^2 \gamma_{110}^2 + \gamma_{010}^2 \gamma_{101}^2 + \gamma_{100}^2 \gamma_{011}^2, \\ d_2 &= \gamma_{000} \gamma_{111} \gamma_{011} \gamma_{100} + \gamma_{000} \gamma_{111} \gamma_{101} \gamma_{010} + \\ &\quad \gamma_{000} \gamma_{111} \gamma_{110} \gamma_{001} + \gamma_{011} \gamma_{100} \gamma_{101} \gamma_{010} + \\ &\quad \gamma_{011} \gamma_{100} \gamma_{110} \gamma_{001} + \gamma_{101} \gamma_{010} \gamma_{110} \gamma_{001} + \\ d_3 &= \gamma_{000} \gamma_{110} \gamma_{101} \gamma_{011} + \gamma_{111} \gamma_{001} \gamma_{010} \gamma_{100}. \end{aligned} \quad (15)$$

Кроме того, был использован трёхчастичный аналог выражения для конкуренса (10):

$$\begin{aligned} Q_3 &= |\gamma_{111} \gamma_{000} - \gamma_{001} \gamma_{110}| + |\gamma_{111} \gamma_{000} - \gamma_{010} \gamma_{101}| + \\ &\quad |\gamma_{111} \gamma_{000} - \gamma_{100} \gamma_{011}| + |\gamma_{001} \gamma_{110} - \gamma_{010} \gamma_{101}| + \\ &\quad |\gamma_{001} \gamma_{110} - \gamma_{100} \gamma_{011}| + |\gamma_{010} \gamma_{101} - \gamma_{100} \gamma_{011}|. \end{aligned} \quad (16)$$

Аналогично двухчастичному случаю (9)-(10), обращение в ноль этой величины гарантирует факторизацию трёхчастичного состояния (6) тремя

индивидуальными состояниями $|\psi_A\rangle, |\psi_B\rangle, |\psi_C\rangle^2$. Как и для метрики (14), это значение соответствует независимому принятию решений, т.е. нулевой согласованности.

В отличие от двухчастичного случая (11), метрики (14) и (16) зависят от большого числа фазовых параметров ϕ_{abc} (7), варьирование которых не представлялось возможным в силу ограниченности доступного вычислительного времени. По этой причине все такие параметры брались равными нулю, что соответствует действительным значениям амплитуд γ_{abc} в состоянии (6). Аналогично двухчастичному случаю (8), эти величины вычислялись на основе экспериментальных данных как:

$$\gamma_{abc} = \sqrt{p_{abc}}, \quad p_{abc} = \frac{n_{abc}}{n}, \quad (17)$$

где например n_{100} есть полное число торгов, в которых среди трех рассматриваемых субъектов A, B, C участие принимал только первый.

Не-квантовой метрикой трёхсторонней согласованности является величина:

$$\theta_{123} = \log \frac{p_{111}p_{100}p_{010}p_{001}}{p_{110}p_{101}p_{011}p_{000}}, \quad (18)$$

использованная для анализа корреляции нейронных вспышек [66]. Отсутствию корреляции соответствует нулевая величина этой метрики, принимающей как положительные, так и отрицательные значения. Как и квантовая метрика (14), эта величина отражает подлинно-трехстороннюю корреляцию, нечувствительную к двухсторонним корреляциям в парах, входящих в тройку (там же).

3. Эксперимент. Представленная модель использована для выявления согласованного экономического поведения юридических лиц на основе информации, опубликованной в сети Интернет. Состав и методы получения данных описаны в Разделе 3.1. Раздел 3.2 описывает процедуру их численной обработки. Результаты эксперимента для двусторонних и трёхсторонних метрик представлены в следующем разделе 4.

3.1. Данные. Используемые в работе данные делятся на два типа. Первый тип - это данные об участии юридических лиц в государственных закупках, на основе которых строится модель поведения, описанная в Разделе 2. Второй тип - это данные о фактах согласованного поведения,

²Это условие достаточно, но не необходимо. Альтернативой использованному является определение трёхстороннего конкуренса, данное в [65].

установленных Федеральной Антимонопольной Службой (ФАС). Эти данные использованы в качестве экспертной оценки, позволившей оценить точность разработанной модели согласованного поведения. Данные обоих типов приводились в соответствие на основе индивидуального налогового номера (ИНН), однозначно характеризующим каждое юридическое лицо.

Данные системы ФАС. Источником данных этого типа являлась база судебных решений и правовых актов ФАС, расположенная в открытом доступе по адресу <https://br.fas.gov.ru>. Были использованы документы, опубликованные Управлением по борьбе с картелями в текстовом формате, допускающем автоматическую обработку. За период с 2015 по 2020 г. таким образом извлечено 734 протокола, содержащих информацию о поведении юридических лиц общим числом 1457 ИНН. Для рабочей выборки ИНН, описанной в следующем параграфе, число пар находящихся в сговоре ИНН составило 2038.

Данные системы госзакупок. Данные этого типа получены из единой информационной системы <https://zakupki.gov.ru>, предоставляющей открытый доступ к базам данных об участии юридических лиц в государственных закупках через интерфейс FTP³. Полученные данные имеют формат таблицы, в которой строки соответствуют отдельным ИНН, а столбцы - отдельным торгам. А каждой ячейке находится число 1 или 0, обозначающее участие либо неучастие данного ИНН в данном торге. За период с 2015 по 2020 год по региону Москва данная таблица содержит 151228 ИНН и 952856 торгов.

В силу большого объема данных, а также недостоверности оценки вероятностей входящих в выражения (11) и (12) при числе участий меньше 10, использование полной таблицы указанного размера нецелесообразно. Рабочая выборка ИНН была сформирована из подозреваемой части и фона. Подозреваемая часть, состоящая из 210 ИНН, получена по следующим критериям:

- количество участий данного ИНН в торгах более 20;
- по информации ФАС, данный ИНН находится в сговоре как минимум с одним другим ИНН из выборки.

³Использовался адрес <ftp://ftp.zakupki.gov.ru> с логином/паролем free/free и IP-адресом сервера 95.167.245.94. В корневом каталоге в папке «fcs_regions» содержатся данные по отдельным регионам России. Каталог «protocols» содержит заархивированные папки, каждая из которых содержит файлы XML содержащие протоколы торгов. Файлы XML сгруппированы по годам по 1000 файлов в одной папке. Необходимая информация содержится в полях с тегами и “purchaseNumber” и “INN”. На момент обращения (декабрь 2021 г.) были доступны данные с марта 2014 г. по октябрь 2021 г.

Фоновая часть из 190 ИНН была выбрана случайным образом из оставшихся первичных данных. Полученная в результате таблица из 400 ИНН и 86831 торгов составила рабочую выборку объемом 66,3 Мб. Распределение ИНН по числу участия показано на рисунке 1.

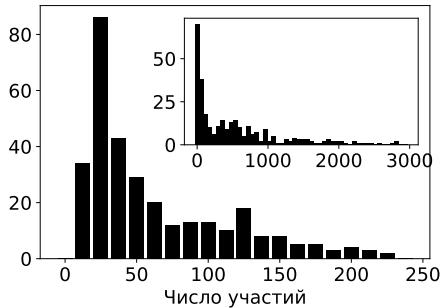


Рис. 1. Распределение 400 ИНН по числу участия в 86831 торгах рассматриваемой выборки. Вставка: то же самое после преобразования таблицы с учётом окружений (раздел 3.2)

3.2. Методика. Двусторонний случай. Полученная выборка из 400 уникальных ИНН позволила проанализировать $400 \times 399/2 = 79800$ уникальных пар ИНН. Каждая такая пара соответствует двум строкам таблицы данных, отражающих участие рассматриваемых ИНН в 86831 торгах. Каждый торг при этом имеет четыре взаимоисключающих исхода, представляемых базисными состояниями $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$, охватывающими все варианты совместного участия. Распределение торгов по данным исходам определяется числами n_{ab} , в сумме дающими полное их число $n = 86831$.

В соответствии с формулой (8), на основе величин n_{ab} определяется когнитивное состояние каждой пары субъектов (5). Это состояние далее используется для вычисления метрики запутанности конкуренс (11) для различных значений фазового параметра Δ , в том числе 0° и 180° . Для сравнения также вычислялись значения классического коррелятора (12) и классической взаимной информации (13). Данный набор значений для каждой пары ИНН является результатом теоретического моделирования. Для оценки точности выявления, эти результаты сравнивались с данными ФАС, представляемыми в виде строки длиной 79800, состоящей из нулей и 2038 единиц, описывающих отсутствие либо наличие сговора для данной пары ИНН (рисунок 2).

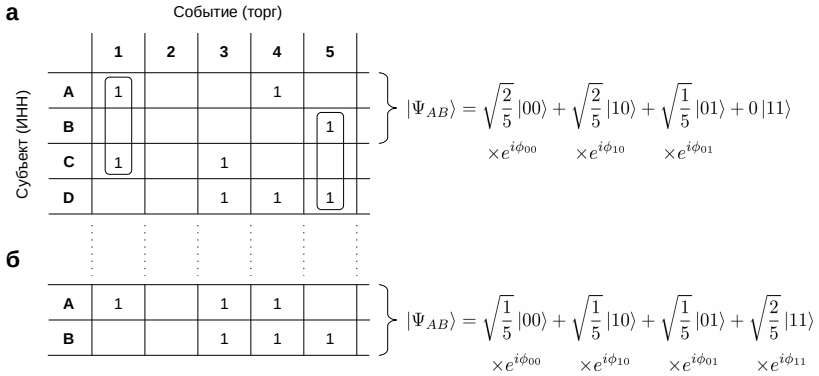


Рис. 2. Построение двухчастичного когнитивного состояния (5) субъектов А и В на основе данных об участии в пяти торгах. а: Базовый метод, применённый к исходной таблице данных. Факты участия отмечены единицами, пустые клетки обозначают неучастие субъекта в данном торге. В соответствии с (7) и (8), амплитуды компонент состояния есть квадратные корни статистических вероятностей соответствующих исходов, дополненные фазовыми множителями $e^{i\phi_{ij}}$. б: Модификация метода с учётом окружений. В каждую строку (А и В) добавляются единицы для торгов, в которых участвовал кто-либо из окружений данных субъектов (С и D, соответственно). Когнитивное состояние пары АВ далее вычисляется на основе модифицированной таблицы данных согласно базовому алгоритму

Для исследования влияния фазового параметра Δ на точность моделирования, в дополнение к вышеуказанным метрикам также вычислялось значение Q_{fit} метрики конкуренс с оптимизированной величиной фазового параметра. А именно, для пар находящихся и не находящихся в сговоре использовались значения $\Delta = 180^\circ$ и 0° , соответственно максимизирующие и минимизирующие значение метрики (11) аналогично работе [56].

Трёхсторонний случай. Та же самая исходная выборка из 400 ИНН позволила проанализировать $400 * 399 * 398 / 6 = 10586800$ уникальных троек ИНН. По данным ФАС, в сговоре среди них подозревалось 22820 троек.

Аналогично двухчастичному случаю, распределение торгов по восьми возможным исходам определяется счётчиками n_{abc} , дающими в сумме полное число торгов 86831. В соответствии с (17), амплитуды γ_{abc} трёхсторонних состояний (6) определялись как квадратные корни

статистических вероятностей. Метрики (16), (14) и (17) далее вычислялись на основе полученных действительныхзначных амплитуд.

Модификация методики с учётом окружений. Несмотря на отсечку в 20 и более торгов для каждого ИНН, матрица исходных данных является разреженной. Всего в них содержится 115369 событий участия, так что в матрице $400 * 86831$ единицами занято порядка 0,003 от полного числа ячеек. Соответственно, в двухчастичных и трехчастичных состояниях (5), (6) доминируют компоненты $|00\rangle$ и $|000\rangle$, тогда как члены с двумя, и тем более с тремя единицами практически не встречаются. Обращение в ноль соответствующих вероятностей и амплитуд переводит рассматриваемые метрики согласованности в вырожденный режим, малоэффективный для решаемой задачи.

Для решения этой проблемы вышеописанная методика модифицирована следующим образом. Считается, что субъект участвовал во всех торгах, в которых участвовали все субъекты, с которыми он соучаствовал в каком-либо торге в рамках рассматриваемой выборки. Множество таких соучастников есть *окружение*, участвовавшее в много большем числе торгов чем исходный субъект - центр данного окружения (вставка на рисунке 1). Соответственно, каждая строка исходной матрицы данных пересекается со строками окружения как показано на рисунке 2, после чего применяется стандартный метод расчёта амплитуд.

4. Результаты

4.1. Результаты двустороннего моделирования. Значение метрики конкуренс с фиксированным значением фазового параметра $\Delta = 0^\circ$ для исследованных пар ИНН, отсортированных по этой величине, показано слева на рисунке 3(а) красной линией. Вертикальными линиями отмечены пары, состоящие в сговоре по данным ФАС. Серой кривой показана плотность этих линий, рассчитанная как бегущее среднее с шириной окна 500. Корреляция Пирсона между этой функцией и значением метрики составляет 0,93. Аналогичный результат для фазы $\Delta = 180^\circ$ показан синей линией на панели (б). Для удобства сравнения, значение метрики в обоих случаях умножено на постоянный коэффициент ≈ 8 , не влияющий на величину корреляций.

Рисунки 3(г) соответствуют взаимной информации (13) и классическому коррелятору (12). Как и предыдущие метрики, эти величины коррелируют с плотностью сговоров, однако коэффициенты корреляции (0,33 и 0,73 соответственно) уступают метрике конкуренс.

Работа тех же метрик с учётом окружений представлена на рисунке 3 (с окружениями).

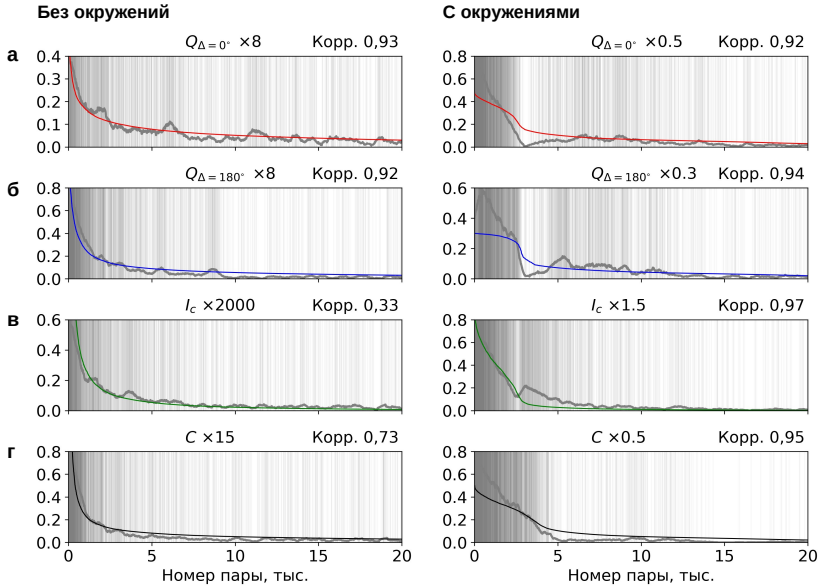


Рис. 3. Значения метрик согласованности для первых 20000 из 79800 пар ИНН, отсортированных по значению каждой метрики в порядке убывания. Вертикальными линиями отмечены 2038 пар, находящиеся в сговоре по данным ФАС. Локальная плотность линий показана серой кривой. Наименования метрик, а также их корреляции с локальными плотностями сговоров в каждом случае указаны над графиками. Верхние два ряда: метрика конкуренс (11) при фиксированных значениях фазы $\Delta = 0^\circ$ (а) и $\Delta = 180^\circ$ (б). Нижние ряды: взаимная информация (13) (в) и классический коррелятор (12) (г). Слева: расчёт без учёта окружений. Справа: расчёт с учётом окружений (рисунок 2)

Как видно по расположению вертикальных линий, группировка сговоров на высоких значениях метрик становится более плотной. Пропорциональность между метриками и плотностями сговоров, характерная для случая “без окружений”, нарушается. Корреляция классических метрик (в, г) при этом возрастает до уровня 0,95 - 0,97, превосходя квантово-теоретические метрики (а, б).

Качество сортировки пар ИНН рассматриваемыми метриками в той же цветовой кодировке показано на рисунке 4. Линии показывают положение 2038 сговоров в массиве пар, отсортированном по каждой из метрик. Для каждой метрики, точка с горизонтальной координатой 1, например, показывает положение сговора с наибольшим значением метрики. На соответствующей панели рисунка 3, этот сговор показан

первой слева серой линией, тогда как ее положение на оси X есть вертикальная координата точки на рисунке 4. Точечная прямая на вставке соответствует идеальной метрике, которая расположила бы все 2038 сговоров на первых 2038 позициях в сортировке.

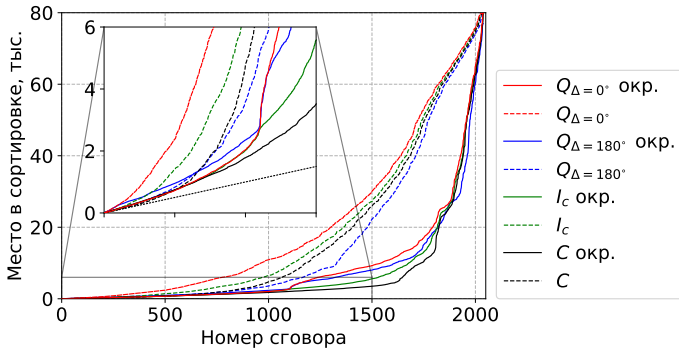


Рис. 4. Расположение 2038 сговоров в массиве пар ИНН, отсортированном по различным метрикам согласованности. Цветовая кодировка метрик совпадает с рисунком 3, случаи с учётом и без учёта окружений показаны сплошными и пунктирными линиями. Точечная прямая на вставке соответствует идеальной сортировке, располагающей сговора на первых 2038 местах

Для каждой метрики результаты с учётом и без учёта окружений показаны сплошными и пунктирными линиями. За исключением небольшого диапазона в начале горизонтальной оси, сплошные линии во всех случаях располагаются ниже пунктирных линий того же цвета. Таким образом, учёт окружений делает сортировку более качественной, группируя сговора в начале отсортированного массива пар более плотно.

Учёт окружений также меняет взаимное расположение линий на рисунке 4. Без учёта окружений, наиболее и наименее плотные группировки достигаются метриками конкуренс с фазами $\Delta = 180^{\circ}$ и $\Delta = 0^{\circ}$ соответственно, тогда как классические метрики занимают промежуточное положение. Как отмечено выше, учёт окружений существенно улучшает работу последних, так что сплошные зеленая и чёрная линии на рисунке 4 лежат ниже синей и красной в диапазоне $\sim 1100 - 1800$. Тысяча сговоров при этом группируется на первых ~ 2000 местах сортировки всеми метриками.

4.2. Результаты трёхстороннего моделирования. Метрики трёхсторонней запутанности вычислялись на основе трёхчастичных состояний как описано в разделе 3.2. Значения трёхчастичной

модификации метрики конкуренс (16), квантовой метрики (14) и классической метрики (18) показаны на рисунке 5а, 5б и 5в для троек ИНН, отсортированных по значению соответствующей метрики. Для метрик Q_3 и τ показаны первые 10 тысяч из полного числа 10586800 троек.

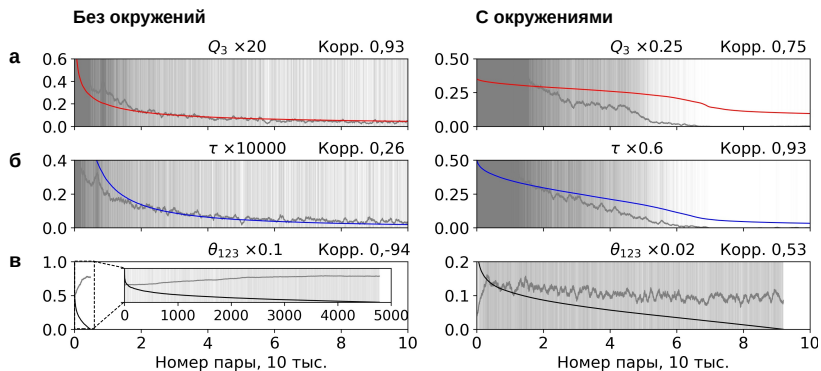


Рис. 5. Значения метрик согласованности для первых 10^5 из 10586800 троек ИНН, отсортированных по значению каждой метрики в порядке убывания: а) трехчастичная модификация метрики конкуренс (16); б) квантовая метрика (14); в) классическая метрика (18). Как и на рисунке 3, вертикальными линиями отмечены тройки, находящиеся в сговоре по данным ФАС, их локальная плотность показана серыми линиями. Слева: расчёты без учёта окружений. Справа: расчёты с учётом окружений

Как и в двустороннем случае, учёт окружений увеличивает плотность группировки сговоров (серые линии) на высоких значениях метрик Q_3 и τ . При этом, корреляция плотности сговоров со значением метрики Q_3 падает с 0,93 до 0,75, тогда как для метрики τ та же величина возрастает с 0,26 до 0,53. Как и на рисунке 3, коэффициенты 20, 0,25, 10000 и 0,6, не меняющие значение корреляции, подобраны для удобства визуального сравнения цветных и серых линий.

Без учёта окружений классическая метрика θ_{123} определена лишь для 4781 троек, для которых знаменатель (18) отличен от нуля. Как показано на рисунке 5в слева, метрика коррелирует с плотностью сговоров отрицательно с коэффициентом Пирсона -0,94. Учёт окружений увеличивает число определённых троек до 92014, причём корреляция меняется на положительную с коэффициентом 0,53.

Качество сортировки трёхсторонних сговоров рассматриваемыми метриками в той же цветовой кодировке показано на рисунке 6.

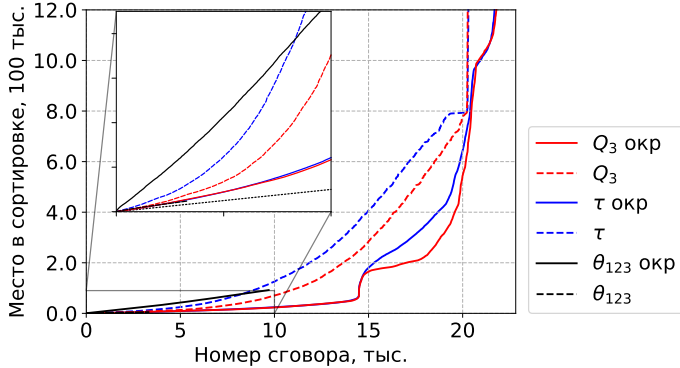


Рис. 6. Аналог рисунка 4 для трёхстороннего случая: расположение 22820 тройных сговоров в массиве троек ИНН, отсортированных по значениям трёхчастичных метрик согласованности. Точечная линия на вставке соответствует идеальной сортировке, располагающей 10^4 сговоров на 10^4 первых мест в сортировке

Как и на рисунке 4, сплошные и пунктирные линии соответствуют алгоритмам с учётом и без учёта окружений, соответственно. Метрики Q_3 (красный) и τ (синий) определены для всех 22820 тройных сговоров, тогда как метрика θ_{123} (чёрный) определена для 3303 сговоров без учёта окружений и для 9695 сговоров с учётом окружений.

Для первых двух метрик использование окружений приводит к улучшению качества сортировки на всём диапазоне значений. Наилучший результат показан трёхсторонним аналогом метрики конкуренс (16), превосходящей квантовую метрику (14) для выявления от 15 до 20 тыс. (70 – 90%) сговоров.

4.3. Достоверность выявления сговоров. Разработанные методы измерения согласованности поведения можно использовать для выявления возможных сговоров на основе открытых данных. Для этого каждая пара либо тройка ИНН относится к классу “Сговор есть” либо “Сговора нет” на основе значения соответствующей метрики. В этом отношении графики на рисунках 4 и 6 эквивалентны функциям ошибок (точность - полнота, ROC), используемым для оценки качества бинарной категоризации [67].

Для практического использования интерес представляет вероятность наличия сговора для пар / троек ИНН, отсеянных из общей выборки по критерию превышения метрикой некоторого порогового уровня. Эта вероятность вычисляется на основе рисунков 4 и 6 как отношение номера сговора к месту в сортировке, тогда как различным

пороговым значениям соответствуют различные точки на кривых. Полученная таким образом зависимость достоверности выявления двусторонних сговоров от числа подозреваемых для соответствующих метрик показана на рисунке 7.

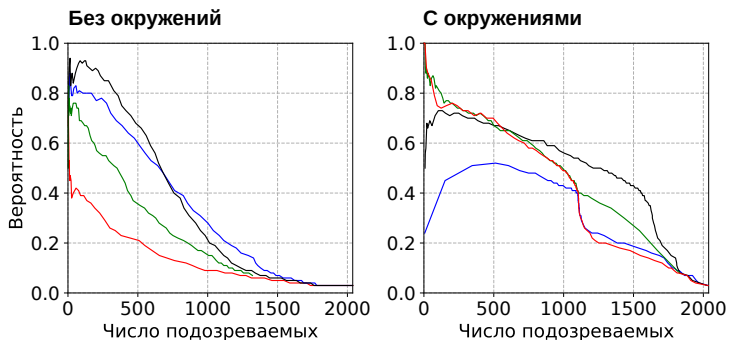


Рис. 7. Достоверность выявления двусторонних сговоров при отборе определённого числа подозреваемых пар с наибольшим значением метрик. Цветовая кодировка как на рисунках 3 и 4

Без учёта окружений и для небольшого числа подозреваемых наибольшую точность показывает метод на основе классического коррелятора (чёрная линия на левой панели). 350 сговорившихся пар, т.е. 17% от полного числа двусторонних сговоров, например, можно выявить с достоверностью около 80%. В случае, когда требуется рекомендация по одной трети от полного числа сговоров и более, большую точность показывает метрика конкуренс с фазой $\Delta = 180^\circ$ (синяя линия). Методы на основе конкуренс с фазой $\Delta = 0^\circ$ и классической взаимной информации (красная и зеленая линии) менее достоверны.

При учёте окружений предпочтительность метрик меняется. Наибольшую точность выявления до четверти сговоров показывают методы на основе конкуренс с фазой $\Delta = 0^\circ$ и классической взаимной информации (красная и зеленая линии), причём для малого числа подозреваемых достоверность стремится к единице. Классический коррелятор, напротив, становится выгоден для большого числа подозреваемых, позволяя выявить две трети сговоров с достоверностью около 50%.

Аналогичный результат для тройных сговоров показан на рисунке 8. В соответствии с рисунком 6 квантово-теоретические метрики Q_3 и τ показывают сходную достоверность. Помимо отмеченного выше небольшого преимущества первой в диапазоне 15-20 тыс. сговоров, на

данном графике виден ещё один подобный интервал до 1.5 тыс. (6%) сговоров.

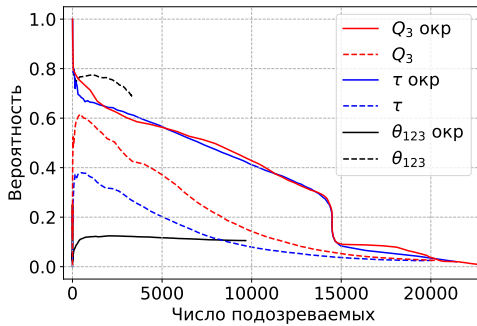


Рис. 8. Трёхсторонний аналог рисунка 7: достоверность выявления трёхсторонних сговоров при отборе определённого числа подозреваемых пар с наибольшим значением метрик. Цветовая кодировка как на рисунках 5 и 6

В отличие от квантовых метрик, классическая величина θ_{123} показывает лучшую достоверность без учёта окружений. В частности, до 2000 сговоров (10% от полного числа) могут быть выявлены с достоверностью более 75%. Более 3303 (14%) сговоров, однако, с помощью данной метрики выявить невозможно в силу обращения в ноль знаменателя в (18). В данном диапазоне оптимальными являются рассмотренные выше квантово-теоретические метрики.

Сговор с заказчиком. Помимо рассмотренного сговора между исполнителями, распространённым правонарушением является сговор между исполнителем и заказчиком. При этом заказчик обычно усложняет условия торга с тем, чтобы они подходили только для предполагаемого подрядчика. В силу открытости информации об участниках, выявление сговоров этого типа достаточно просто. Если в торге участвует, например, единственный подрядчик, то по законодательству РФ для заключения государственного контракта необходимо получить согласие ФАС, предусматривающее индивидуальное рассмотрение каждого случая в “ручном” режиме.

Именно поэтому участники сговора часто выбирают такой способ сокрытия своей договорённости, как привлечение других участников торгов. В целях создания видимости конкурентной ситуации, эти участники играют по заранее распределённым ролям, которые, как и состав участников, могут меняться [6]. Разработанный метод направлен именно на этот тип сговоров, наиболее трудный для обнаружения. Сговор

между подрядчиками при этом часто указывает и на сговор с заказчиком, что также требует отдельного рассмотрения в каждом случае.

5. Обсуждение. Представленные результаты подтверждают эффективность методов анализа данных для выявления скрытых особенностей коллективного поведения. Информация, извлекаемая из открытых данных с помощью сравнительно простых алгоритмов, может быть использована в целях информационного противоборства, конкурентной разведки и обеспечения общественной безопасности [68 – 73]. Разработанный алгоритм расширяет семейство таких методов на новую предметную область.

Сравнение классических и квантово-теоретических метрик согласованности поведения не выявило безусловной предпочтительности тех или других. Для двустороннего случая, в частности, оптимальный выбор зависит от доли подозреваемых и желаемой достоверности оценки (рисунок 7). Выявление трёхсторонних связей, напротив, в большинстве случаев оказалось значительно более точным при использовании квантовых метрик (рисунок 8). Данный результат указывает на перспективность дальнейшей разработки квантовых моделей коллективного поведения. Для моделирования запутанных состояний многочастичных ансамблей разработаны открытые библиотеки [74, 75], предоставляющие широкий выбор квантово-теоретических методов анализа данных.

В развитие представленного подхода интерес представляет, во-первых, возможность психологической интерпретации фазовых параметров поведенческих состояний (5), (6), в настоящей работе использовавшихся формально. Данные параметры могут быть использованы для кодирования эмоционально-смысловых состояний субъектов принятия решений [76], играющих важнейшую роль в коллективном поведении [77]. Как показано в задачах оценки смысловой близости языковых понятий [56] и семантического анализа численных данных [78], использование фазовых параметров позволяет существенно повысить точность результата. Данное направление таким образом сопрягается с задачами моделирования коллективных психологических процессов [42, 79, 80]. Семантическая интерпретация квантовой фазы, в частности, позволяет использовать для этой цели существующие модели и методы [81, 82]. Кроме того, интерес представляет введение в модель дополнительных параметров, описывающих субъектность акторов рассматриваемого поведения. Соответствующие степени свободы также имеются в квантовых моделях принятия решений.

Литература

1. Ferguson A. Policing predictive policing // *Washington University Law Review*. 2017. vol. 94. no. 5. p. 1109.
2. Yang F. *Oxford Research Encyclopedia of Criminology and Criminal Justice* // Oxford University Press. 2019. vol. 44. no. 1. pp. 57–61.
3. McDaniel J., Pease K. *Predictive Policing and Artificial Intelligence* // Routledge, Taylor Francis Group. 2021. 330 p.
4. Berk R. Artificial Intelligence, Predictive Policing, and Risk Assessment for Law Enforcement // *Annual Review of Criminology*. 2021. vol. 4. no. 1. pp. 209–237.
5. Официальный сайт Федеральная Антимонопольная служба. URL: fas.gov.ru (дата обращения: 02.09.2022).
6. Юрьев Р.Н., Алоджанц А.П. Проблема сговора участников торгов и пути ее решения в рамках парадигмы цифровой экономики с применением квантовой теории вероятностей // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2021. №. 10. С. 139–149.
7. Bajari P., Ye L. Deciding Between Competition and Collusion // *Review of Economics and Statistics*. 2003. vol. 85. no. 4. pp. 971–989.
8. Ballesteros-Perez P., Skitmore M., Das R., del Campo-Hitschfeld M. Quick Abnormal-Bid-Detection Method for Construction Contract Auctions // *Journal of Construction, Engineering and Management*. 2015. vol. 141. no. 7. p. 04015010.
9. Huber M., Imhof D. Machine learning with screens for detecting bid-rigging cartels // *International Journal of Industrial Organization*. 2019. vol. 65. pp. 277–301.
10. Garcia Rodriguez M., Rodriguez-Montequin V., Ballesteros-Perez P., Love P., Signor R. Collusion detection in public procurement auctions with machine learning algorithms // *Automation in Construction*. 2022. vol. 133. p. 104047.
11. Наследов А.Д. Математические методы психологического исследования. Анализ и интерпретация данных // *Речь*. 2004. 392 с.
12. Харченко М.А. Корреляционный анализ // ВГУ. 2008. 31с.
13. Марченко В.М., Можей Н.П., Шинкевич Е.А. Эконометрика и экономико-математические методы и модели // Минск: БГТУ. 2011. 157 с.
14. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика // М: Юнити. 2012.
15. Killworth P., Russell H. Informant Accuracy in Social Network Data III: A Comparison of Triadic Structure in Behavioral and Cognitive Data // *Social Networks*. 1979. vol. 2. pp. 19–46.
16. Morgenstern O., Schwodiauer G. Competition and collusion in bilateral markets // *Zeitschrift fur Nationalokonomie*. 1976. vol. 36. no. 3–4. pp. 217–245.
17. Thomas C., Wilson B. A Comparison of Auctions and Multilateral Negotiations // *The RAND Journal of Economics*. 2002. vol. 33. no. 1. p. 140.
18. Uddin S., Hossain L. Dyad and Triad Census Analysis of Crisis Communication Network // *Social Networking*. 2013. vol. 2. no. 1. pp. 32–41.
19. Holland P., Leinhardt S. The Statistical Analysis of Local Structure in Social Networks // *Sociological Methodology*. 1974. p. 45.
20. Martean L. The Triangle and the Eye inside the Circle: Dyadic and Triadic Dynamics in the Group // *Group Analysis*. 2014. vol. 47. no. 1. pp. 42–61.
21. Razmi P., Oloomi Buygi M., Esmalifalak M. A Machine Learning Approach for Collusion Detection in Electricity Markets Based on Nash Equilibrium Theory // *Group Analysis*. 2021. vol. 9. no. 1. pp. 170–180.

22. Ball P. The physical modelling of society: a historical perspective // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002. vol. 314. no. 1–4. pp. 1–14.
23. Jorion P. Accounting for human activity through physics // *Cybernetics and Systems*. 2004. vol. 35. no. 2–3. pp. 275–284.
24. Galam S. *Sociophysics. A Physicist's Modeling of Psycho-political Phenomena* // Boston, MA: Springer US. 2012. p. 439.
25. Maldonado C.E. *Quantum Theory and the Social Sciences* // *Momento*. 2019. no. 59E. pp. 34–47.
26. Meghdadi A., Akbarzadeh-T., Javidan K. A Quantum-Like Model for Predicting Human Decisions in the Entangled Social Systems // *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2022. pp. 1–11.
27. Meyer D. *Quantum Strategies* // *Physical Review Letters*. 1999. vol. 82. no. 5. pp. 1052–1055.
28. Eisert J., Wilkens M., Lewenstein M. *Quantum Games and Quantum Strategies* // *Physical Review Letters*. 1999. vol. 83. no. 15. pp. 3077–3080.
29. Marinatto L., Weber T. A quantum approach to static games of complete information // *Physics Letters A*. 2000. vol. 272. pp. 291–303.
30. Yukalov V., Yukalova E., Sornette D. Role of collective information in networks of quantum operating agents // *Physica A*. 2022. vol. 598. p. 127365.
31. Pothos E., Perry G., Corr P., Matthew M., Busemeyer J. Understanding cooperation in the Prisoner's Dilemma game // *Personality and Individual Differences*. 2011. vol. 51. no. 3. pp. 210–215.
32. Pelosse Y. The Intrinsic Quantum Nature of Nash Equilibrium Mixtures // *Journal of Philosophical Logic*. 2017. vol. 45. no. 1. pp. 25–64.
33. Baatique B. *Quantum finance. Path Integrals and Hamiltonians for Options and Interest Rates* // Cambridge. 1998.
34. Khrennikov A. Quantum-psychological model of the stock market // *Problems and Perspectives in Management*. 2003. pp. 136–148.
35. Bagarello F. Stock markets and quantum dynamics: A second quantized description // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2007. vol. 386. no. 1. pp. 283–302.
36. Choustova O. Quantum probability and financial market // *Information Sciences*. 2009. vol. 179. no. 5. pp. 478–484.
37. Goncalves C.P. Quantum financial economics - risk and returns // *Journal of Systems Science and Complexity*. 2013. vol. 26. no. 2. pp. 187–200.
38. Tahmasebi F., Meskinimood S., Namaki A., Vasheghani Farahani S., Jalalzadeh S., Jafari G.R. Financial market images: A practical approach owing to the secret quantum potential // *EPL (Europhysics Letters)*. 2015. vol. 109. no. 3. p. 30001.
39. Orrell D. A quantum model of supply and demand // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2020. vol. 539. p. 122928.
40. Athalye V., Haven E. *Socio-Economic Sciences: Beyond Quantum Math-like Formalisms* // *Quantum Reports*. 2021. vol. 3. no. 4. pp. 656–663.
41. Khrennikov A. Social laser model: from color revolutions to Brexit and election of Donald Trump // *Kybernetes*. 2018. vol. 47. no. 2. pp. 273–288.
42. Tsarev D., Trofimova A., Alodjants A., Khrennikov A. Phase transitions, collective emotions and decision-making problem in heterogeneous social systems // *Scientific Reports*. 2019. vol. 9. no. 1. p. 18039.
43. Alodjants A., Bazhenov A., Khrennikov A., Bukhanovsky A. Mean-field theory of social laser // *Scientific Reports*. 2022. vol. 12. no. 1. p. 8566.

44. Словохотов Ю.Л. Физика и социофизика. Ч. 2. Сети социальных взаимодействий. Эконофизика // Проблемы управления. 2012. № 2. С. 2–31.
 45. Haven E., Khrennikov A. Quantum Social Science // NY: Cambridge University Press. 2013. 297 p.
 46. Orrell D. A Quantum Theory of Money and Value // Economic Thought. 2017. vol. 5. no. 2. pp. 19–28.
 47. Khrennikov A., Haven E. Quantum-like Modeling: from Economics to Social Laser // Asian Journal of Economics and Banking. 2020. vol. 4. no. 1. pp. 87–99.
 48. Orrell D. The value of value: A quantum approach to economics, security and international relations // Security Dialogue. 2020. vol. 51. no. 5. pp. 482–498.
 49. Суров И.А., Алоджанц А.П. Модели принятия решений в квантовой когнитивистике // СПб.: Университет ИТМО. 2018. 63 с.
 50. Peres A. Unperformed experiments have no results // American Journal of Physics. 1978. vol. 46. no. 7. pp. 745–747.
 51. Bell J. Against “measurement” // Physics World. 1990. vol. 3. pp. 32–41.
 52. Ballentine L. Propensity, Probability, and Quantum Theory // Foundations of Physics. 2017. vol. 46. no. 8. pp. 973–1005.
 53. Surov I. Quantum Cognitive Triad: Semantic Geometry of Context Representation // Foundations of Science. 2020. vol. 26. no. 4. pp. 947–975.
 54. Horodecki R., Horodecki P., Horodecki M., Horodecki K. Quantum entanglement // Reviews of Modern Physics. 2009. vol. 81. no. 2. pp. 865–942.
 55. Hill S., Wootters W. Entanglement of a Pair of Quantum Bits // Physical Review Letters. 1997. vol. 78. no. 26. pp. 5022–5025.
 56. Surov I., Semenenko E., Platonov A., Bessmertny I., Galofaro F., Toffano Z., Khrennikov A., Alodjants A. Quantum semantics of text perception // Scientific Reports. 2021. vol. 11. no. 1. p. 4193.
 57. Caves C., Fuchs C., Rungta P. Entanglement of Formation of an Arbitrary State of Two Qubits // Foundations of Physics Letters. 2001. vol. 14. no. 3. pp. 199–212.
 58. Wootters W. Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits // Physical Review Letters. 1998. vol. 80. no. 10. pp. 2245–2248.
 59. Vidal G., Werner R. Computable measure of entanglement // Physical Review A. 2002. vol. 65. no. 3. p. 032314.
 60. Vedral V. The role of relative entropy in quantum information theory // Reviews of Modern Physics. 2002. vol. 74. no. 1. pp. 197–234.
 61. Eisert J., Plenio M. A comparison of entanglement measures // Journal of Modern Optics. 1999. vol. 46. no. 1. pp. 145–154.
 62. Miranowicz A., Grudka A. A comparative study of relative entropy of entanglement, concurrence and negativity // Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics. 2004. vol. 6. no. 12. pp. 542–548.
 63. Верещагин Н.К., Щепин Е.В. Информация, кодирование и предсказание // М.: ФМОП МЦНМО. 2012. 236 с.
 64. Coffman V., Kundu J., Wootters W. Distributed entanglement // Physical Review A. 2000. vol. 61. no. 5.
 65. Gao X., Fei S., Wu K. Lower bounds of concurrence for tripartite quantum systems // Physical Review A. 2006. vol. 74. no. 5. pp. 1–9.
 66. Nakahara H., Amari S. Information-Geometric Measure for Neural Spikes // Neural Computation. 2002. vol. 14. no. 10. pp. 2269–2316.
 67. Fawcett T. An introduction to ROC analysis // Pattern Recognition Letters. 2006. vol. 27. no. 8. pp. 861–874.
- 438 Информатика и автоматизация. 2023. Том 22 № 2. ISSN 2713-3192 (печ.)
ISSN 2713-3206 (онлайн) www.ia.spcras.ru

68. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства // М: Физматлит. 2010. 228 с.
69. Vitali S., Glattfelder J., Battiston S. The Network of Global Corporate Control // PLoS ONE. 2011. vol. 6. no. 10.
70. Седаков Д., Филонов П. Разведка сетью: как система Avalanche помогает спецслужбам и бизнесу // Forbes. 2015.
71. Дорофеев А.В., Марков А.С. Структурированный мониторинг открытых персональных данных в сети интернет // Мониторинг правоприменения. 2017. № 18. С. 30–39.
72. Пилькевич С.В., Мажников П.В. Современные исследования в области мониторинга и анализа данных социальных сетей // Защита информации. Инсайд. 2018. № 70. С. 41–53.
73. Масалович А.И. Верона (англ. Verona) – компьютерная программа интеллектуального мониторинга сети Интернет и экспресс-анализа открытых данных № RU 2021660918 // 2021.
74. Johansson J., Nation P., Nori F. QuTiP: An open-source Python framework for the dynamics of open quantum systems // Computer Physics Communications. 2012. vol. 183. no. 8. pp. 1760–1772.
75. Aleksandrowicz G. et al. Qiskit: An Open-source Framework for Quantum Computing // Zenodo. 2019. DOI: 10.5281/zenodo.2562111.
76. Surov I.A. Quantum core affect. Color-emotion structure of semantic atom // Frontiers in Psychology. 2022. vol. 13.
77. Лебон Г. Психология народов и масс // Академический проект. 2021. 272 с.
78. Kozhisseri S., Surov I. Quantum-probabilistic SVD: complex-valued factorization of matrix data // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2022. vol. 22. no. 3. pp. 567–573.
79. Гнидко К.О., Ломачко А.Г. Моделирование Индивидуального и группового поведения субъектов массовой коммуникации в р-адических системах координат для индикации уровня контаминации сознания // Вопросы Кибербезопасности. 2017. № 15. С. 54–68.
80. Иванов О.С., Пилькевич С.В., Гнидко К.О., Лохвицкий В.А., Дудкин А.С., Сабиров Т.Р. Обоснование терминологического базиса исследований форм проявления контаминации психики человека // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2019. С. 69–76.
81. Яньшин П.В. Цветосоциометрия. Исследование эмоционального состояния группы // Сборник научных трудов ученых Московского городского педагогического университета и Бакинского славянского университета. ред. Мыльников М.А. 2010. С. 278–288.
82. Петренко В.Ф. Основы психосемантики // М.: Эксмо. 2010. 480 с.

Семененко Евгений Константинович — аспирант, Университет ИТМО. Область научных интересов: информационный поиск, анализ текстов, когнитивно-поведенческое моделирование, квантовая семантика. Число научных публикаций — 6. semenenko.e.k@yandex.ru; Кронверкский проспект, 49А, 197101, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(931)247-7376.

Белопицкая Анна Геннадьевна — аспирант, Университет ИТМО. Область научных интересов: квантовые графы, теория рассеяния, спектральная теория линейных операторов. Число научных публикаций — 5. annabell1502@mail.ru; Кронверкский проспект, 49А, 197101, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(952)399-5142.

Юрьев Родион Николаевич — аспирант, Университет ИТМО. Область научных интересов: искусственный интеллект, обработка неструктурированных данных, экономика. Число научных публикаций — 8. juryev7@gmail.com; Кронверкский проспект, 49А, 197101, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(921)908-1432.

Алоджанц Александр Павлович — д-р физ.-мат. наук, профессор, Университет ИТМО. Область научных интересов: квантовая информация, квантовые алгоритмы, задачи принятия решения, анализ текстов и семантика. Число научных публикаций — 125. alexander_ar@list.ru; Кронверкский проспект, 49А, 197101, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(921)885-4734.

Бессмертный Игорь Александрович — д-р техн. наук, профессор, Университет ИТМО. Область научных интересов: искусственный интеллект, производственные системы, информационный поиск, компьютерная лингвистика. Число научных публикаций — 80. bessmertny@itmo.ru; Кронверкский проспект, 49А, 197101, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)233-2476.

Суров Илья Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, Университет ИТМО. Область научных интересов: когнитивно-поведенческое моделирование, квантовая семантика. Число научных публикаций — 25. ilya.a.surov@itmo.ru; Кронверкский проспект, 49А, 197101, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)232-1467.

Поддержка исследований. Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках гос. задания № 2019-1339 Министерства науки и высшего образования РФ, а также гранта Фонда содействия инновациям № 569ГУЦЭС8-D3/62160.

E. SEMENENKO , A. BELOLIPETSKAYA , R. YURIEV , A. ALODJANTS ,
I. BESSMERTNY , I. SUROV
**DISCOVERY OF ECONOMIC COLLUSION BY METRICS OF
QUANTUM ENTANGLEMENT**

Semenenko E., Belolipetskaya A., Yuriev R., Alodjants A., Bessmertny I., Surov I. **Discovery of Economic Collusion by Metrics of Quantum Entanglement.**

Abstract. An effective economy requires prompt prevention of misconduct of legal entities. With the ever-increasing transaction rate, an important part of this work is finding market collusions based on statistics of electronic traces. We report a solution to this problem based on a quantum-theoretical approach to behavioral modeling. In particular, cognitive states of economic subjects are represented by complex-valued vectors in space formed by the basis of decision alternatives, while decision probabilities are defined by projections of these states to the corresponding directions. Coordination of multilateral behavior then corresponds to entanglement of the joint cognitive state, measured by standard metrics of quantum theory. A high score of these metrics indicates the likelihood of collusion between the considered subjects. The resulting method for collusion discovery was tested with open data on the participation of legal entities in public procurement between 2015 and 2020 available at the federal portal <https://zakupki.gov.ru>. Quantum models are built for about 80 thousand unique pairs and 10 million unique triples of agents in the obtained dataset. The reliability of collusion discovery was defined by comparison with open data of Federal antimonopoly service available at <https://br.fas.gov.ru>. The achieved performance allows the discovery of about one-half of known pairwise collusions with a reliability of more than 50%, which is comparable with detection based on classical correlation and mutual information. For three-sided behavior, in contrast, the quantum model is practically the only available option since classical measures are typically limited to the bilateral case. Half of such collusions are detected with a reliability of 40%. The obtained results indicate the efficiency of the quantum-probabilistic approach to modeling economic behavior. The developed metrics can be used as informative features in analytic systems and algorithms of machine learning for this field.

Keywords: collusion, cartel, decision making, quantum cognition, quantum entanglement, behavioral modeling, recommendation systems.

References

1. Ferguson A.G. Policing predictive policing. *Washington University Law Review*. 2017. vol. 94. no. 5. p. 1109.
2. Yang F. *Oxford Research Encyclopedia of Criminology and Criminal Justice* Oxford University Press. 2019. vol. 44. no. 1. pp. 57–61.
3. McDaniel J., Pease K. *Predictive Policing and Artificial Intelligence* Routledge, Taylor Francis Group. 2021. 330 p.
4. Berk R. *Artificial Intelligence, Predictive Policing, and Risk Assessment for Law Enforcement Annual Review of Criminology*. 2021. vol. 4. no. 1. pp. 209–237.
5. Oficial'nyj sajt Federal' naja Antimonopol' naja sluzhba. Available at: fas.gov.ru (accessed: 09.2022). (In Russ.).
6. Yuriev R.N., Alodjants A.P. [The problem of collusion of bidders and ways to solve it in the framework of digital economics paradogms and by using quantum probability theory]. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki – Modern Science: Actual*

- Problems of Theory and Practice. Series: Natural and technical sciences. 2021. no. 10. pp. 139–149. (In Russ.).
7. Bajari P., Ye L. Deciding Between Competition and Collusion. *Review of Economics and Statistics*. 2003. vol. 85. no. 4. pp. 971–989.
 8. Ballesteros-Perez P., Skitmore M., Das R., del Campo-Hitschfeld M. Quick Abnormal-Bid-Detection Method for Construction Contract Auctions. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2015. vol. 141. no. 7. p. 04015010.
 9. Huber M., Imhof D. Machine learning with screens for detecting bid-rigging cartels. *International Journal of Industrial Organization*. 2019. vol. 65. pp. 277–301.
 10. Garcia Rodriguez M., Rodriguez-Montequin V., Ballesteros-Perez P., Love P., Signor R. Collusion detection in public procurement auctions with machine learning algorithms. *Automation in Construction*. 2022. vol. 133. p. 104047.
 11. Nasledov A.D. *Matematicheskie metody psihologicheskogo issledovanija. Analiz i interpretacija dannyh* [Mathematical methods of psychological research. Data analysis and interpretation]. Rech', 2004. p. 392. (In Russ.).
 12. Harchenko M.A. *Korreljacionnyj analiz* [Correlation analysis]. VGU, 2008. 31p. (In Russ.).
 13. Marchenko V.M., Mozhej N.P., Shinkevich E.A. *Jekometrika i jekonomiko-matematicheskie metody i modeli* [Econometrics and economic-mathematical methods and models]. Minsk: BGTU, 2011. p. 157. (In Russ.).
 14. Kremer N.Sh. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. M: Yuniti. 2012. (In Russ.).
 15. Killworth P., Russell H. Informant Accuracy in Social Network Data III: A Comparison of Triadic Structure in Behavioral and Cognitive Data. *Social Networks*. 1979. vol. 2. pp. 19–46.
 16. Morgenstern O., Schwodiauer G. Competition and collusion in bilateral markets. *Zeitschrift fur Nationalokonomie*. 1976. vol. 36. no. 3–4. pp. 217–245.
 17. Thomas C., Wilson B. A Comparison of Auctions and Multilateral Negotiations. *The RAND Journal of Economics*. 2002. vol. 33. no. 1. p. 140.
 18. Uddin S., Hossain L. Dyad and Triad Census Analysis of Crisis Communication Network. *Social Networking*. 2013. vol. 2. no. 1. pp. 32–41.
 19. Holland P., Leinhardt S. The Statistical Analysis of Local Structure in Social Networks. *Sociological Methodology*. 1974. p. 45.
 20. Martean L. The Triangle and the Eye inside the Circle: Dyadic and Triadic Dynamics in the Group. *Group Analysis*. 2014. vol. 47. no. 1. pp. 42–61.
 21. Razmi P., Oloomi Buygi M., Esmalifalak M. A Machine Learning Approach for Collusion Detection in Electricity Markets Based on Nash Equilibrium Theory. *Group Analysis*. vol. 9. no. 1. pp. 170–180.
 22. Ball P. The physical modelling of society: a historical perspective. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002. vol. 314. no. 1–4. pp. 1–14.
 23. Jorion P. Accounting for human activity through physics. *Cybernetics and Systems*. 2004. vol. 35. no. 2–3. pp. 275–284.
 24. Galam S. *Sociophysics. A Physicist's Modeling of Psycho-political Phenomena* Boston, MA: Springer US. 2012. p. 439.
 25. Maldonado C. *Quantum Theory and the Social Sciences Memento*. 2019. no. 59E. pp. 34–47.
 26. Meghdadi A., Akbarzadeh-T., Javidan K. A Quantum-Like Model for Predicting Human Decisions in the Entangled Social Systems *IEEE Transactions on Cybernetics*. pp. 1–11.

27. Meyer D.A. Quantum Strategies. *Physical Review Letters*. 1999. vol. 82. no. 5. pp. 1052–1055.
28. Eisert J., Wilkens M., Lewenstein M. Quantum Games and Quantum Strategies. *Physical Review Letters*. 1999. vol. 83. no. 15. pp. 3077–3080.
29. Marinatto L., Weber T. A quantum approach to static games of complete information. *Physics Letters A*. 2000. vol. 272. pp. 291–303.
30. Yukalov V., Yukalova E., Sornette D. Role of collective information in networks of quantum operating agents. *Physica A*. 2022. vol. 598. p. 127365.
31. Pothos E., Perry G., Corr P., Matthew M., Busemeyer J. Understanding cooperation in the Prisoner's Dilemma game. *Personality and Individual Differences*. vol. 51. no. 3. pp. 210–215.
32. Pelosse Y. The Intrinsic Quantum Nature of Nash Equilibrium Mixtures. *Journal of Philosophical Logic*. 2016. vol. 45. no. 1. pp. 25–64.
33. Baatique B.E. *Quantum finance. Path Integrals and Hamiltonians for Options and Interest Rates*. Cambridge. 1998.
34. Khrennikov A. Quantum-psychological model of the stock market *Problems and Perspectives in Management*. 2003. pp. 136–148.
35. Bagarello F. Stock markets and quantum dynamics: A second quantized description. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2007. vol. 386. no. 1. pp. 283–302.
36. Choustova O. Quantum probability and financial market *Information Sciences*. 2009. vol. no. 5. pp. 478–484.
37. Goncalves C.P. Quantum financial economics – risk and returns *Journal of Systems Science and Complexity*. 2013. vol. 26. no. 2. pp. 187–200.
38. Tahmasebi F., Meskinimood S., Namaki A., Vasheghani Farahani S., Jalalzadeh S., Jafari G. Financial market images: A practical approach owing to the secret quantum potential. *EPL (Europhysics Letters)*. 2015. vol. 109. no. 3. p. 30001.
39. Orrell D. A quantum model of supply and demand *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2020. vol. 539. p. 122928.
40. Athalye V., Haven E. *Socio-Economic Sciences: Beyond Quantum Math-like Formalisms* *Quantum Reports*. 2021. vol. 3. no. 4. pp. 656–663.
41. Khrennikov A. Social laser model: from color revolutions to Brexit and election of Donald Trump *Kybernetes*. 2018. vol. 47. no. 2. pp. 273–288.
42. Tsarev D., Trofimova A., Alodjants, A., Khrennikov A. Phase transitions, collective emotions and decision-making problem in heterogeneous social systems *Scientific Reports*. 2019. vol. 9. no. 1. p. 18039.
43. Alodjants A., Bazhenov A., Khrennikov A., Bukhanovsky A. Mean-field theory of social laser *Scientific Reports*. 2022. vol. 12. no. 1. p. 8566.
44. Slovohtov Ju.L. [Physics and sociophysics. Part 2. Networks of social interactions. *Econophysics*]. *Problemy upravleniya – Management issues*. 2012. no. 2. pp. 2–31. (In Russ.).
45. Haven E., Khrennikov A. *Quantum Social Science*. NY: Cambridge University Press.
46. Orrell D. *A Quantum Theory of Money and Value* *Economic Thought*. 2016. vol. 5. no. 2. pp. 19–28.
47. Khrennikov A., Haven E. Quantum-like Modeling: from Economics to Social Laser. *Asian Journal of Economics and Banking*. 2020. vol. 4. no. 1. pp. 87–99.
48. Orrell D. The value of value: A quantum approach to economics, security and international relations. *Security Dialogue*. 2020. vol. 51. no. 5. pp. 482–498.
49. Surov I.A., Alodjants A.P. Modeli prinjatija reshenij v kvantovoj kognitivistike [Decision models in quantum cognitive science]. SPb.: Universitet ITMO, 2018. 63 p. (In Russ.).

50. Peres A. Unperformed experiments have no results *American Journal of Physics*. 1978. vol. 46. no. 7. pp. 745–747.
51. Bell J.S. Against “measurement”. *Physics World*. 1990. vol. 3. pp. 32–41.
52. Ballentine L. Propensity, Probability, and Quantum Theory. *Foundations of Physics*. vol. 46. no. 8. pp. 973–1005.
53. Surov I. Quantum Cognitive Triad: Semantic Geometry of Context Representation. *Foundations of Science*. 2020. vol. 26. no. 4. pp. 947–975.
54. Horodecki R., Horodecki P., Horodecki M., Horodecki K. Quantum entanglement. *Reviews of Modern Physics*. 2009. vol. 81. no. 2. pp. 865–942.
55. Hill S., Wootters W. Entanglement of a Pair of Quantum Bits. *Physical Review Letters*. vol. 78. no. 26. pp. 5022–5025.
56. Surov I., Semenenko E., Platonov A., Bessmertny I., Galofaro F., Toffano Z., Khrennikov A., Alodjants A. Quantum semantics of text perception. *Scientific Reports*. vol. 11. no. 1. p. 4193.
57. Caves C., Fuchs C., Rungta P. Entanglement of Formation of an Arbitrary State of Two Rebits. *Foundations of Physics Letters*. 2001. vol. 14. no. 3. pp. 199–212.
58. Wootters W. Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits. *Physical Review Letters*. 1998. vol. 80. no. 10. pp. 2245–2248.
59. Vidal G., Werner R. Computable measure of entanglement. *Physical Review A*. 2002. vol. 65. no. 3. p. 032314.
60. Vedral V. The role of relative entropy in quantum information theory. *Reviews of Modern Physics*. 2002. vol. 74. no. 1. pp. 197–234.
61. Eisert J., Plenio M. A comparison of entanglement measures. *Journal of Modern Optics*. vol. 46. no. 1. pp. 145–154.
62. Miranowicz A., Grudka A. A comparative study of relative entropy of entanglement, concurrence and negativity. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*. vol. 6. no. 12. pp. 542–548.
63. Vereshhagin N.K., Shhepin E.V. Informacija, kodirovanie i predskazanie [Information, coding and prediction]. M.: FMOP MCNMO, 2012. p. 236. (In Russ.).
64. Coffman V., Kundu J., Wootters W. Distributed entanglement. *Physical Review A*. 2000. vol. 61. no. 5.
65. Gao X. Fei S. Wu K. Lower bounds of concurrence for tripartite quantum systems. *Physical Review A*. 2006. vol. 74. no. 5.
66. Nakahara H., Amari S. Information-Geometric Measure for Neural Spikes. *Neural Computation*. 2002. vol. 14. no. 10. pp. 2269–2316.
67. Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 2006. vol. 27. no. 8. pp. 861–874.
68. Gubanov D.A., Novikov D.A., Chhartishvili A. Social’nye seti: modeli informacionnogo vlijanija, upravljenija i protivoborstva [Social networks: models of information influence, control and confrontation]. M: Fizmatlit. 2010. p. 228. (In Russ.).
69. Vitali S., Glattfelder J.B., Battiston S. The Network of Global Corporate Control. *PLoS ONE*. 2011. vol. 6. no. 10.
70. Sedakov D., Filonov P. Razvedka set’ju: kak sistema Avalanche pomogaet specsluzhbam i biznesu [Network intelligence: how the Avalanche system helps intelligence agencies and businesses]. *Forbes*. 2015. (In Russ.).
71. Dorofeev A.V., Markov A.S. [Structured monitoring of open personal data on the Internet]. *Monitoring pravoprimenenija – Law enforcement monitoring*. 2017. no. 18. pp. 30–39. (In Russ.).

72. Pil'kevich S.V., Mazhnikov P.V. [Modern research in the field of monitoring and data analysis of social networks]. *Zashhita informacii. Insajd – Protection of information*. Inside. 2018. no. 70. pp. 41–53. (In Russ.).
73. Masalovich A.I. [Verona is a computer program for intelligent monitoring of the Internet and express analysis of open data No. RU 2021660918]. 2021. (In Russ.).
74. Johansson J., Nation P., Nori F. QuTiP: An open-source Python framework for the dynamics of open quantum systems. *Computer Physics Communications*. 2012. vol. 183. no. 8. pp. 1760–1772.
75. Aleksandrowicz G. et al. Qiskit: An Open-source Framework for Quantum Computing. *Zenodo*. 2019. DOI: 10.5281/zenodo.2562111.
76. Surov I.A. Quantum core affect. Color-emotion structure of semantic atom. *Frontiers in Psychology*. 2022. vol. 13.
77. Lebon G. [Psychology of peoples and masses]. *Akademicheskij proekt – Academic project*. 2021. p. 272. (In Russ.).
78. Kozhisseri S., Surov I. Quantum-probabilistic SVD: complex-valued factorization of matrix data. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2022. vol. 22. no. 3. pp. 567–573.
79. Gnidko K.O., Lomako A.G. [Modeling Individual and Group Behaviors subjects of mass communication in p-adic coordinate systems for indicating the level of contamination of consciousness]. *Voprosy Kiberbezopasnosti – Issues of Cybersecurity*. 2017. no. 15. pp. 54–68. (In Russ.).
80. Ivanov O.S., Pil'kevich S.V., Gnidko K.O., Lohvickij V.A., Dudkin A.S., Sabirov T.R. [Substantiation of the terminological basis for research on the forms of manifestation of contamination of the human psyche]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Serija: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie – Bulletin of the Russian New University. Series: Complex systems: models, analysis and control*. 2019. pp. 69–76. (In Russ.).
81. Yanshin P.V. [Study of the emotional state of the group]. *Sbornik nauchnyh trudov uchenyh Moskovskogo gorodskogo pedagogicheskogo universiteta i Bakinskogo slavyanskogo universiteta – Collection of scientific works of scientists of the Moscow City Pedagogical University and Baku Slavic University*. Ed.: Mylnikov M. 2010. pp. 278–288. (In Russ.).
82. Petrenko V.F. *Osnovy psihosemantiki [Fundamentals of psychosemantics]*. M.: Eksmo. 2010. (In Russ.).

Semenenko Evgeny — Postgraduate student, ITMO University. Research interests: information retrieval, text analysis, cognitive behavioral modeling, quantum semantics. The number of publications — 6. semenenko.e.k@yandex.ru; 49A, Kronverksky Av., 197101, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(931)247-7376.

Belolipetskaya Anna — Postgraduate student, ITMO University. Research interests: quantum graphs, scattering theory, spectral theory of linear operators. The number of publications — 5. annabell1502@mail.ru; 49A, Kronverksky Av., 197101, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(952)399-5142.

Yuriev Rodion — Postgraduate student, ITMO University. Research interests: artificial intelligence, unstructured data processing, economics. The number of publications — 8. juryev7@gmail.com; 49A, Kronverksky Av., 197101, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(921)908-1432.

Alodjants Alexander — Ph.D., Dr.Sci., Professor, ITMO University. Research interests: quantum information, quantum algorithms, decision-making tasks, text analysis and semantics. The number of publications — 125. alexander_ap@list.ru; 49A, Kronverksky Av., 197101, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(921)885-4734.

Bessmertny Igor — Ph.D., Dr.Sci., Professor, ITMO University. Research interests: artificial intelligence, production systems, information retrieval, computational linguistics. The number of

publications — 80. bessmertny@itmo.ru; 49A, Kronverksky Av., 197101, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)233-2476.

Surov Илья — Ph.D., Associate professor, ITMO University. Research interests: cognitive-behavioral modeling, quantum semantics. The number of publications — 25. ilya.a.surov@itmo.ru; 49A, Kronverksky Av., 197101, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)232-1467.

Acknowledgements. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant № 2019-1339 and Fund for promotion of innovations, grant № 569ГУЦЭС8-D3/62160.