УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Суров И.А., Алоджанц А.П.

МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В КВАНТОВОЙ КОГНИТИВИСТИКЕ

Учебное пособие

$|\Psi\rangle$

Санкт-Петербург, 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Суров И.А., Алоджанц А.П.

МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В КВАНТОВОЙ КОГНИТИВИСТИКЕ

Учебное пособие

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению 09.04.02 Информационные системы и технологии
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

Санкт-Петербург, 2018

Суров И. А., Алоджанц А.П. Модели принятия решений в квантовой когнитивистике. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 63с.

Рецензент:
Бессмертный Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор

Настоящее пособие представляет собой введение в математическое моделирование принятия решений – фундаментального процесса когнитивной деятельности человека – на принципах квантовой теории. В пособии освещены наиболее эффективные методы квантового моделирования феноменов когнитивно-поведенческой иррациональности человека, не имеющих удовлетворительного описания в рамках классических моделей. Значительное внимание уделено изложению методологических основ квантовой когнитивистики и установлению междисциплинарных связей естественных и гуманитарных наук.

Пособие предназначено для магистрантов направлений подготовки 09.04.02 «Информационные системы и технологии» и 01.04.02 «Прикладная математика и информатика», специализирующихся на моделировании когнитивно-поведенческих социальных процессов, разработке антропоморфного искусственного интеллекта, систем поддержки принятия решений и анализа больших данных.

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных фотонных технологий, один из немногих Российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров известный как проект «5» в «100». Цель университета ИТМО – становления исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

©Университет ИТМО, 2018
© Суров И.А., Алоджанц А.П., 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

1. ПРЕДПОСЫЛКИ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ В МОДЕЛИРОВАНИИ КОГНИТИВНО-ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 7
1.1 Становление научной психологии 7
1.2 Методология классической и квантовой физики 8
1.3 Проблемы классической методологии в науках о человеке 9
1.3.1 Детерминизм 9
1.3.2 Редукционизм 9
1.3.3 Текущая ситуация 10
1.4 Методология квантовой теории в науках о человеке 10
1.4.1 Квантовая контекстуальность 10
1.4.2 Метод динамического программирования 10
1.4.3 Квантово-подобная семантика 11
1.4.4 Квантово-подобная биология 11
1.5 Схема «Стимул-Организм-Ответ» 12
1.6 Задания для самопроверки и дополнительной работы 13

2. ПОНЯТИЙНЫЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ КВАНТОВОЙ КОГНИТИВИСТИКИ 14
2.1 Неопределённость и опыт 14
2.2 Квантовое состояние 15
2.2.1 Смешанные состояния 16
2.2.2 Чистые состояния 17
2.2.3 Состояния произвольной чистоты 19
2.2.4 Запутанные состояния 20
2.3 Геометрическая модель двухвариантной неопределённости 21
2.4 Квантовая логика 22
2.4.1 Классическая логика 22
2.4.2 Открытие квантовой логики 24
2.4.3 Нарушение булевой логики в квантовой теории 24
2.4.4 Квантовая логика в макроскопических системах 27
2.5 Задания для самопроверки и дополнительной работы 27

3. КВАНТОВЫЕ МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ 29
3.1 Задача моделирования поведения человека 29
3.2 Экспериментальные результаты 30
3.2.1 Дилемма заключённого 30
3.2.2 Эффект порядка 31
3.2.3 Ошибка конъюнкции 32
3.2.4 Нарушение принципа определённости 32
3.3 Модели дискретной когнитивной динамики 33
3.3.1 Классические модели 34
3.3.2 Квантовое моделирование эффектов порядка и ошибки конъюнкции 34
3.3.3 Квантовое моделирование нарушений закона полной вероятности…. 35
3.3.4 Управление когнитивно-поведенческой системой 36
3.4 Модели непрерывной когнитивной динамики 38
3.4.1 Гамильтонова динамика когнитивных состояний 39
3.4.2 Динамическое моделирование дилеммы заключённого 39
3.4.3 Модели случайного блуждания 40
3.4.4 Принятие решений в непрерывном спектре возможностей 42
3.5 Бессознательные когнитивные процессы 44
3.5.1 Двухуровневая модель психики человека 44
3.5.2 Рациональная полезность и фактор привлекательности 45
3.5.3 Аппарат ментальных инструментов и POVM 47
3.6 Задания для самопроверки и дополнительной работы 49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 50
ИСТОЧНИКИ 51

ВВЕДЕНИЕ

Современные условия глобальной сетевой связности, скорости информационного метаболизма и социально-технологической динамики не имеют исторических прецедентов. В эпоху, когда облик планеты во многом определяется деятельностью человека, выработка адекватных данным обстоятельствам принципов устойчивого развития общества является задачей общецивилизационной важности. Исторически сложившиеся науки о человеке – психология, когнитивистика, социология, экономика, культорология, история, и другие – оказались, однако, неспособными решить данную задачу, свидетельством чему служит нарастающий поток социально-экономических кризисов последних десятилетий.

Главных причин такого несоответствия возможностей гуманитарных наук своим задачам две. Во-первых, это метрологическая несостоятельность, т.е. ущербность либо полное отсутствие соответствий между их понятийным аппаратом и набором измеримых величин и методов измерения; такая ситуация характерна, например, для современной истории и психологии. Гуманитарные же науки, имеющие свои наборы измеримых величин и методы измерений, характеризуются отсталостью своей методологии от предметов своего исследования. К этой второй причине относятся, в частности, социология и экономика, современные теории в которых построены по образцу естественных наук 17-18 веков.

Фундаментальные факторы, обуславливающие методологическую отсталость современных социо-экономических теорий, указаны выше и характеризованы как беспрецедентные в истории человечества: объём информации, релевантной для моделирования, прогнозирования и управления соответствующими процессами несопоставим с возможностями имеющихся обрабатывающих технологий и мощностей. В этой ситуации системы анализа информации, основанные на методологии классического естествознания и выражающей её бинарной логике, становятся бесполезными. Не имея возможности проанализировать полный объём информации об объекте исследования, различные модели описывают его отдельные фрагменты и приходят к несогласующимся заключениям. Эти и другие сопряжённые трудности при работе с информацией в современных условиях известны как проблема «информационного взрыва», она же – проблема «больших данных».

В ситуации информационного взрыва эффективные социо-экономические модели должны основываться на методологии, приспособленной для моделирования процессов, протекание которых в силу недоступности их полного информационного описания не являются предопределённым. Протекание таких процессов контекстуально, т.е. обусловлено их взаимодействием как с внутренними, так и с внешними степенями свободы, также имеющими неполное описание. Такие процессы, в отличие от детерминированных процессов классической физики, социологии и экономики, оказываются предсказуемыми лишь в вероятностном смысле.

В настоящее время единственной методологией, удовлетворяющей данным требованиям и имеющей строгое математическое выражение, является методология квантовой теории, первоначально разработанная для описания контекстуально-вероятностных физических процессов на атомных масштабах. Системы моделирования контекстуально-вероятностных когнитивно-поведенческих и социально-экономических процессов на квантовых принципах, по существу, симулируют мышление человека, приспособленное для решения задач познания и жизнеобеспечения в условиях невозможности полного анализа входных данных в связи с временными либо другими ситуационными ограничениями.

Практическая эффективность квантовой теории в рассматриваемых задачах обусловлена её простой и жёсткой концептуальной структурой, которая даёт возможность количественно моделировать неформализованные ранее закономерности поведенческой психологии исходя из первых принципов теории при помощи малого числа свободных параметров. Альтернативного подхода к моделированию когнитивно-поведенческих процессов как индивидуального, так и коллективного уровней, позволяющего получать сопоставимые результаты, в настоящее время не существует.

В разделе 1 дана краткая историческая справка взаимовлияния естественных и гуманитарных наук, сформулированы классическая и квантовая методологии, рассмотрены их различия, а также предпосылки для применения методов квантовой теории в науках о человеке и информационных технологиях нового поколения.

В разделе 2 дана методологическая и теоретическая основа для трансдисциплинарного применения квантовой теории к моделированию контекстуально-вероятностных процессов в целом и когнитивно-поведенческих процессов в частности. На примере двухвариантной неопределённости изложен базовый понятийный и математический аппарат квантовой теории в применении к моделированию принятия решений.

Раздел 3 посвящён логическому описанию вероятностных событий и процессов, моделируемых с помощью квантовой теории. На примере последовательного разрешения пары альтернатив рассмотрены отличия между логиками классической и квантовой теории вероятностей.

В разделе 4 рассмотрены основные подходы к моделированию принятия решений на квантовых принципах. Описаны классические эксперименты по наблюдению квантово-подобных поведенческих закономерностей, а также модели дискретной и непрерывной когнитивной динамики в процессе принятия индивидуальных и коллективных решений. Представлена двухуровневая модель психики человека, рассмотрена её связь с квантовой парадигмой в когнитивистике.

1. ПРЕДПОСЫЛКИ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ В МОДЕЛИРОВАНИИ КОГНИТИВНО-ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Поведение человека является внешним проявлением работы его психики, которую можно кратко определить, как информационно-алгоритмическое обеспечение организма, реализующее (в частности) его когнитивные функции[1]. В так называемой компьютерной метафоре физиология и психика человека соответствуют аппаратной и программной частям вычислительной машины [1].

1.1 Становление научной психологии

Наука о психике человека – психология – долгое время представляла собой совокупность неточных и трудно сопоставимых между собой наблюдений над состоянием сознания исследователя.

Наиболее известным подходом к построению психологии на основе точных измерений[2] является т.н. бихевиоризм (от англ. behavior – поведение), согласно которому вместо «изучения собственного ума» психологу следует заняться «изучением поведения своего соседа» [2]. Бихевиоризм восходит к работам немецкого психофизиолога Г.Т. Фехнера (1801-1887 г.), согласно которому поведение живой системы однозначно определяется стимулом и параметрами её нервной системы [3]. Логика бихевиоризма выражается двухкомпонентной схемой «Стимул-Ответ», элементы которой связаны детерминированными причинными отношениями.

Логическая схема «Стимул-Ответ» была заимствована Фехнером из классической физики в эпоху расцвета механики Ньютона и Лапласа. Впоследствии, естественнонаучные принципы были положены в основу центральных идей классической психологии; например, австрийский психоаналитик З. Фрейд (1856 – 1932 г.) и североамериканский философ и психолог У. Джеймс (1842 – 1910 г.) почерпнули из них свои концепции психической энергии, подчиняющейся закону сохранения.

В классической монографии [4] Джеймс выдвинул идею дополнительности различных состояний психики, которые составляют различные взгляды на один и тот же объект. Эта идея, опубликованная в 1890 году, была впоследствии заимствована Н. Бором (1885 – 1962 г., Дания) при создании квантовой теории, в которой получила известность как *принцип дополнительности* (англ. complementarity). Бор полагал, что принцип дополнительности и другие принципы квантовой теории имеют фундаментальное значение в общем устройстве природы и проявляются, в частности, в биологии и психологии [5]. Принцип

---

[1] Процессы поиска, получения, обработки, хранения и обмена информацией в живых системах и их сообществах. Включают: ощущение, восприятие, внимание, воображение, эмоциональную активность, память, мышление, речь.

[2] «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немыслима без меры» (Д.И. Менделеев).

дополнительности различных описаний природы получил развитие в сотрудничестве одного из создателей квантовой теории В. Паули (1900 – 1958 г., Австро-Венгрия – Швейцария) и основоположника аналитической психологии К.Г. Юнга (1875 – 1962 г., Швейцария) [6]. Этот процесс междисциплинарного взаимодействия обеспечил обмен фундаментальными идеями физики и психологии и их совместное развитие, но не достиг математической строгости на практическом уровне, подходы к чему были найдены лишь в конце 20 века. Данное пособие представляет собой введение в современную квантовую теорию поведенческой психологии – квантовую теорию принятия решений.

1.2 Методология классической и квантовой физики

Любое научное исследование основано на определённой методологии – системе установок, принципов и методов исследования. До начала 20 века, единственной научной методологией была методология классической физики – механики Ньютона, согласно которой физические системы исследуются посредством независимого изучения их составных частей, а процессы и результаты измерений считаются независимыми от исследовательского вмешательства, одновариантными и точно предсказуемыми. Этой методологии соответствует логическая схема «Стимул-Ответ» классического бихевиоризма.

Развитие квантовой теории привело к появлению в физике альтернативной методологии, согласно которой изучаемые процессы определяются используемой техникой исследования, а также могут обладать принципиально непредсказуемой многовариантностью. В квантовой методологии системы могут обладать качеством целостности, несводимым к сумме качеств отдельных частей [7, 8, гл. 3]. Главные отличия методологий классической и квантовой физики представлены в Табл. 1.1.

Таблица 1.1 Основные различия методологий классической и квантовой физики

Классическая физика	**Квантовая физика**
Детерминизм Процессы одновариантны и в принципе предсказуемы со сколь угодно высокой точностью.	*Многовариантность* Процессы многовариантны. В общем случае предсказуемы лишь вероятности множества возможных вариантов их протекания.
Редукционизм Целое равно сумме частей. Процессы протекают независимо от исследовательского вмешательства [9].	*Целостность* Целое не равно сумме частей. Наблюдаемые процессы обусловлены методами исследовательского вмешательства [10].

1.3 Проблемы классической методологии в науках о человеке

В семидесятых годах 20 века стало ясно, что попытки выстроить психологию по образцу классической физики провалились [11]. В применении к наукам о человеке, с положениями методологии классической физики (Табл. 1.1) связаны следующие принципиальные трудности:

1.3.1 Детерминизм

В классической методологии детерминистическая (предопределённая) динамика классической физики исключает возможность свободного выбора человека, которым обусловлена многовариантность его поведения [12–14].

В отсутствие свободного выбора человек представлял бы собой автомат, следующий заранее заданной программе; данная установка, в частности, выражена в экономической теории ожидаемой полезности, согласно которой экономические решения человека рациональны, т.е. определяются максимизацией некоторой функции полезности [15–17]. Данный подход оказался неработоспособным; систематические нарушения поведенческой рациональности мотивировали поиск новых моделей описания процесса принятия решений [18–20].

В противоположность классическому детерминизму, многовариантность квантовых процессов оставляет пространство для свободного выбора человека [8, с. 18, 14, гл. 1]: в квантовой методологии, в ходе опыта происходит реализация одного из возможных вариантов исследуемого процесса, а не измерение заранее определённого значения физической величины. Эта парадигма находится в согласии с представлениями когнитивной науки, в которых выбор человека конструирует реальность, а не воспроизводит заранее прописанные установки [21, с. 3, 22–24].

1.3.2 Редукционизм

Изучение человека как отдельной системы, существующей вне зависимости от окружающей среды и методов исследования, некорректно.

Описанное выше конструирование реальности действиями человека происходит в неразрывной связи субъекта с обстоятельствами поведенческой ситуации: вместе с объективным и субъективным отношением к ним человека, эти обстоятельства определяют множество возможных вариантов развития событий; поведение человека не может быть осмыслено как множество его собственных решений, принимаемых безотносительно его окружения [8, гл. 13, 21, с. 7, 23, 25, с. 106]. Такая картина трудна для анализа с помощью редукционного подхода классической физики, однако согласуется с контекстуальной методологией квантовой теории [26–29].

1.3.3 Текущая ситуация

Несмотря на эти трудности, подавляющее большинство современных исследований в науках о человеке явно или неявно используют методологию классической физики. Преобладавшая в научной культуре несколько столетий, она по умолчанию включает в себя описание человека как детерминированной биологической машины-биоробота, поведение которого есть действие по максимизации индивидуальной полезности. Такая система взглядов формирует в когнитивной системе человека ущербное мировоззрение, ведущее к кризисам как индивидуальной, так и общественной жизнедеятельности [26, 30, 31]. В частности, теории экономики и социологии, основанные на постулате рационального поведения «агентов», оказываются неспособными описать нарастающий поток социально-экономических кризисов последних десятилетий. Метрологическая состоятельность и предсказательная способность этих теорий вызывают вопросы [32, 33], а последствия их настойчивого применения могут быть катастрофическими [31].

1.4 Методология квантовой теории в науках о человеке

1.4.1 Квантовая контекстуальность

С осмыслением квантовой физики стало ясно, что её методология эффективна в описании поведения не только физических систем атомных размеров, но и макроскопических живых организмов [34]. Подобно квантово-физическим системам, поведение живых организмов определяется не только внешним окружением, но и собственным состоянием, недоступным для прямого внешнего наблюдения [13, гл. 28]. Эта дополнительная степень свободы обуславливает многовариантность поведения системы, т.е. его непредсказуемость для внешнего наблюдателя, для которого моделирование такого поведения может быть лишь вероятностно-статистическим. Квантовая теория представляет собой математический аппарат такого моделирования [35, 36].

Описанная ситуация имеет место во многих предметных областях, в силу чего обуславливает эффективность применения в них квантовой теории [37, 38]; предполагается, что квантовая контекстуальность, или *контекстно-обусловленная актуализация возможностей*, является фундаментальным принципом организации динамических процессов природы [39, 40].

1.4.2 Метод динамического программирования

Квантово-подобная логика описания многовариантных процессов частично выражена в методе динамического программирования, являющемся универсальным инструментом решения большого круга задач управления [41, гл. 15]. Метод динамического программирования решает задачу о нахождении оптимальной функции управления, которая позволит реализовать траекторию состояния объекта управления в пространстве его возможных состояний, максимизирующую значение некоторой целевой функции (Рис. 1.2). Линиями

показаны траектории одновариантных (детерминированных) переходов между возможными состояниями; точки ветвления соответствуют ситуациям неопределённостей, т.е. ситуациям принятия решений[1] [42].

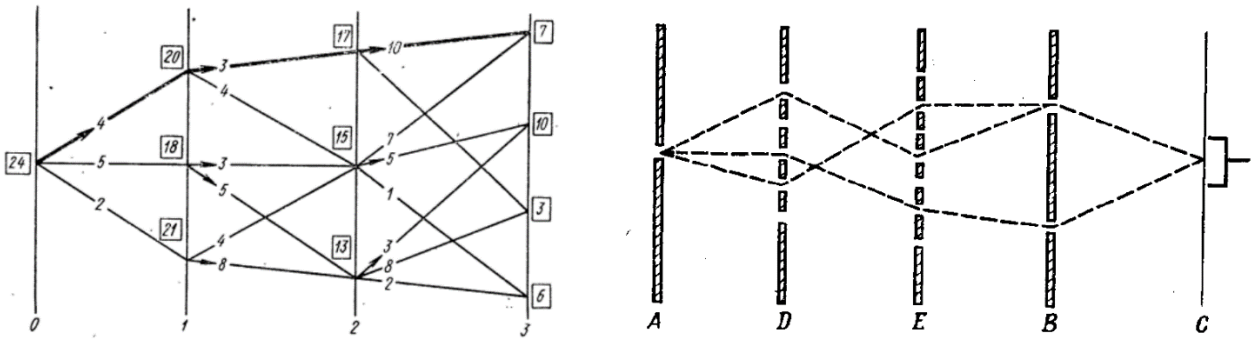

Рисунок 1.1 – Контекстно-зависимая актуализация возможностей: множество возможных траекторий системы в пространстве её состояний. Слева: схема метода динамического программирования [38, с. 314], цифрами показаны значения целевой функции для переходов и состояний. Справа: схема расчёта амплитуд вероятности в интерференционном эксперименте с несколькими экранами [43, с. 33]

1.4.3 Квантово-подобная семантика

Важнейшим полем применения квантово-подобных теорий контекстно-зависимой актуализации возможностей является описание смысловых состояний знаков, например языка. Язык представляет знаковую систему общения, которая не сводится к механическому обмену информацией; ключевой функцией языка, которая обеспечивает стабильность психосоциальных структур, является совместное конструирование и синхронизация смыслов участниками диалога [44–46]. Этот процесс конструирования смысла из языковой формы, допускающей многовариантную интерпретацию, имеет квантово-подобный, контекстуально-обусловленный характер [28, 29, 47, 48]. В силу того что язык играет основополагающую роль в развитии мозга, можно ожидать, что его квантово-подобная структура обуславливает логику мышления и психики человека в целом [45, 49, 50].

1.4.4 Квантово-подобная биология

Эффективность квантово-подобного моделирования выявлена в биологии. Показано что даже простейшие биологические системы обрабатывают информацию в соответствии с принципами квантовой информатики, что лежит в основе способности живых систем к самоорганизации, приспособлению и обучению [42, 51–53].

Предполагается что организационной основой живых систем является квантово-подобная когерентность, которая обеспечивает синхронное, кооперативное функционирование физических процессов жизнеобеспечения [54–

[1] В синергетической терминологии, (детерминированные) траектории соответствуют «руслам», а точки ветвления траекторий – «джокерам» динамической системы [199].

59]. В этом свете квантово-подобные свойства высшей нервной и когнитивной деятельности человека являются закономерными.

1.5 Схема «Стимул-Организм-Ответ»

Логическая схема «Стимул-Организм-Ответ» разработана в поведенческой психологии для моделирования многовариантного поведения живых систем. В этой схеме живая система – Организм – является активным субъектом принятия решений; система характеризуется внутренним состоянием, соотношение которого с состоянием окружения определяет её поведение[1]. Эта схема объемлет детерминистическую двухкомпонентную логику классического бихевиоризма «Стимул-Ответ», в которой предсказание поведения любой системы возможно со сколь угодно высокой точностью [13, гл. 28].

Схема «Стимул-Организм-Ответ» согласуется с методологией квантовой физики [60, 61] (Рис. 1.2). В физике стимул соответствует экспериментальной ситуации – контексту – который представляет собой совокупность параметров рассматриваемой системы и окружения включая конфигурацию экспериментального инструмента. В поведенческой психологии стимулом является ситуация принятия решения, в которую также входит весь относящийся к задаче контекст.

Рисунок 1.2 – Поведенческая парадигма "Стимул-Организм-Ответ" и её соответствие категориям когнитивистики и квантовой физики

В ходе когнитивных процессов обработки информации «Организм» осуществляет субъективную оценку доступных поведенческих альтернатив на основе имеющегося ситуационного контекста и своего внутреннего состояния. В квантовой физике «Организму» соответствует механизм вычисления вероятностей на множестве возможных исходов эксперимента. На последнем шаге «Организм» реализует один из альтернативных вариантов поведения, вероятностное множество которых в виде когнитивно-квантового состояния сформировано на предыдущем этапе [62, с. 336].

Схема «Стимул-Организм-Ответ» применима к описанию любой системы, способной к принятию решений – разрешению многовариантных ситуаций неопределённости: атома, живой клетки, сложного организма [42,

[1] Для внешнего наблюдателя – фундаментально вероятностным образом, см. разд. 1.4.1.

54, 56]. Организмами являются также коллективные структуры: пчелиные ульи, муравейники, стаи рыб, животных и птиц, всевозможные сообщества людей [13, гл. 28, 63–66]; возможно обобщение этой концепции на более абстрактные информационные структуры (культурные, религиозные, политические и т.д.) [8, гл. 13,14, 67–69]. Таким образом, схема «Стимул-Организм-Ответ» представляет собой междисциплинарную парадигму, основанную на методологии квантовой теории. Она выражает собой логику *квантового бихевиоризма* – подхода к моделированию многовариантных поведенческих процессов на основе квантовой теории [60, 61].

1.6 Задания для самопроверки и дополнительной работы

1. Дать определения следующим понятиям:
   информация
   - система, квантовая система, когнитивная система
   - контекстуальность
   - методология
   - смысл

2. Привести примеры биологических, социальных, экологических, экономических процессов, моделирование которых:
   - эффективно классической методологии
   - требует привлечения методологии квантовой теории

3. Соотнести схему «Стимул-Организм-Ответ» и логику присвоения смысловых значений языковым и другим знаковым объекта.

Дополнительные материалы: [70–84]

2. ПОНЯТИЙНЫЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ КВАНТОВОЙ КОГНИТИВИСТИКИ

Схема «Стимул-Организм-Ответ» представляет собой основу современной поведенческой психологии. Как и в любой предметной области, понятийный аппарат позволяет строить языковые модели изучаемых процессов; языковая модель, в меру своей адекватности описываемому процессу, даёт его качественное понимание. Построение же количественных моделей требует соотнесения языковых понятий с определённым математическим аппаратом. Единственная успешная попытка такого соотнесения в поведенческой психологии использует понятийный и математический аппарат квантовой теории.

Фундамент практического применения квантовой теории в психологии был заложен более 40 лет назад советскими учёными И. И. Гуревичем (1912-1992 г.) И. М. Фейгенбергом (1922-2016 г.) в работе «Какие вероятности работают в психологии?» [11]. Авторами выдвигается предположение, согласно которому в предсказании психологических феноменов целесообразным является использование не вероятностей, а квантово-подобных *амплитуд вероятности.* Вскоре после этого также нашим соотечественником, Ю.Ф. Орловым, была разработана первая система соответствия понятий квантовой теории и некоторых понятий поведенческой психологии [85, 86]. В цитированных работах Орловым изложены основы описания процесса принятия решений человеком с помощью квантовой теории, используемые по настоящее время. Идеи Орлова были переоткрыты на Западе уже при изобилии результатов когнитивных экспериментов и сегодня являются общепризнанной основой квантово-подобных моделей в когнитивистике [21, 38, 87, 88].

2.1 Неопределённость и опыт

Базовый процесс, описываемый квантовой теорией, есть процесс разрешения неопределённости состояния исследуемого объекта. Такая неопределённость может быть двух типов:

1. Субъективная неопределённость состояния объекта, вызванная недостатком информированности исследователя. Может быть снята посредством опыта, перезаписывающего информацию о состоянии объекта с одного носителя на другой.

   Пример: неопределённость количества страниц в реально существующей книге.

2. Объективная неопределённость состояния объекта, вызванная фундаментальной многовариантностью процессов природы. Может быть снята посредством опыта, информации об исходе которого ранее не существовало.

   Пример: неопределённость поведения человека в новой для него ситуации.

Оба типа неопределённости разрешаются с помощью опыта.

Опыт *– это акт разрешения неопределённости.*

Оба типа неопределённости наблюдаются как в процессах, традиционно исследуемых естественными науками, так и в когнитивно-поведенческих процессах живых систем. Моделирование неопределённостей первого типа выполняется с помощью классических теорий логики и вероятности [89, 90]. Для моделирования неопределённостей второго типа в естественных науках была создана квантовая физика, а в гуманитарных науках – квантовая когнитивистика и поведенческая психология; в обоих предметных областях для этого используется один и тот же понятийный и математический аппарат квантовой теории [38].

Квантовая теория позволяет моделировать не только второй, но и первый тип неопределённостей. Далее представлен её базовый понятийный и математический аппарат, позволяющий моделировать оба типа неопределённости и применимый как в естественнонаучной, так и в гуманитарной предметной области.

2.2 Квантовое состояние

И в естественных, и в гуманитарных науках необходимо учитывать не только явные параметры моделируемых систем и процессов, но и дополнительные степени свободы, недоступные для прямого наблюдения (разд. 1). В обоих случаях эта дополнительная информация характеризует собственное состояние системы и определяет многовариантную алгоритмику разрешения неопределённости в рассматриваемой ситуации [57].

Квантовое состояние системы (процесса) *– это алгоритмика разрешения неопределённости, определяющая вероятностные закономерности реализации возможных исходов опыта.*

Пусть поведенческая система имеет перед собой фиксированный набор из N взаимоисключающих вариантов развития событий $A = \{a_1 \dots a_N\}$. В квантовой когнитивистике этим вариантам сопоставляются ортогональные базисные векторы $|a_i\rangle$ N-мерного пространства $\mathcal{H}_A$, объемлющего всевозможные поведенческие альтернативы. Алгоритмика принятия решений поведенческой системы представляется в этом пространстве *оператором* $\hat{\rho}$, определяющим поведенческое решение (исход), принимаемое системой в ответ на внешнее поведенческое предложение:

$$|\text{исход}\rangle = \hat{\rho}\,|\text{предложение}\rangle. \tag{2.1}$$

Вероятность того, что поведенческая система принимает по предложению a_i положительное решение, определяется похожестью данного

предложения и полученного исхода. В пространстве $\mathcal{H}_A$ мерой такой похожести является скалярное произведение соответствующих векторов:

$$\begin{aligned} p(\text{предложение}) &= \langle \text{предложение} | \text{исход} \rangle \\ &= \langle \text{предложение} | \, \hat{\rho} \, | \text{предложение} \rangle. \end{aligned} \tag{2.2}$$

Вероятность p измеряется как доля рассматриваемых решений в ансамбле экспериментальных результатов, которому может соответствовать, например, множество решений испытуемых экспериментальной выборки.

2.2.1 Смешанные состояния

Возьмём для примера $N = 2$ и систему альтернатив

$$\begin{aligned} a_1 &= \text{естественнонаучное образование}, \\ a_2 &= \text{гуманитарное образование}, \end{aligned} \tag{2.3}$$

и будем считать, что они являются взаимоисключающими. В квантовой когнитивистике, такие исходы $|a_1\rangle$ и $|a_2\rangle$ составляют ортонормированный базис пространства возможностей $\mathcal{H}_A$, что записывается как

$$\langle a_i | a_j \rangle = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad i = j, \\ 0, & \text{если} \quad i \neq j. \end{cases} \tag{2.4}$$

Рассмотрим ситуацию, когда поведенческая система уже разрешила многовариантность $\{a_1, a_2\}$, т.е., например, человек выбрал и закончил соответствующее учебное заведение, однако нам, как стороннему исследователю, неизвестно, какой вариант развития событий реализовался. Измеряемая нами статистическая вероятность реализации каждого из вариантов a_i определена заранее и равна p_i. Данной алгоритмике разрешения неопределённости соответствует оператор

$$\hat{\rho} = p_1 |a_1\rangle\langle a_1| + p_2 |a_2\rangle\langle a_2| \leftrightarrow \begin{bmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{bmatrix}, \qquad p_1 + p_2 = 1. \tag{2.5}$$

Проверка: используем правило (2.2) и находим

$$\begin{aligned} p(a_1) &= \langle a_1 | \, \hat{\rho} \, | a_1 \rangle = [1 \;\; 0] \begin{bmatrix} p_1 & \\ & p_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = p_1, \\ p(a_2) &= \langle a_2 | \, \hat{\rho} \, | a_2 \rangle = [0 \;\; 1] \begin{bmatrix} p_1 & \\ & p_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = p_2. \end{aligned} \tag{2.6}$$

Оператор (2.5) называется *статистической смесью* состояний a_i. Если, как в случае (2.5), матричное представление оператора плотности диагонально, то соответствующее квантовое состояние называется максимально смешанным.

Максимально смешанное квантовое состояние *– алгоритмика разрешения неопределённости первого типа (разд. 2.1).*

В алгоритмике максимально смешанного состояния ***опыт*** представляет собой *перезапись информации о системе с системы на носитель, доступный исследователю, что позволяет снять субъективную определённость первого типа. Такой опыт есть то, что в методологии классической физики называется* ***измерением.***

Одновременно с набором $\{a_1,\ a_2\}$ могут разрешаться другие альтернативы. Это может быть, например, двухвариантность

$$\begin{aligned} b_1 &= \text{Азия}, \\ b_2 &= \text{Европа}, \end{aligned} \tag{2.7}$$

характеризующая местоположение учебного заведения. Алгоритмике разрешения двух многовариантностей $\{a_i\}$ и $\{b_i\}$ описанным выше образом соответствует аналогичный (2.5) оператор

$$\hat{\rho} = \sum_{i,j=1}^{2} p_{ij} |a_i b_j\rangle\langle a_i b_j| \leftrightarrow \begin{bmatrix} p_{11} & & & \\ & p_{12} & & \\ & & p_{21} & \\ & & & p_{22} \end{bmatrix}, \qquad \sum_{i,j=1}^{2} p_{ij} = 1, \tag{2.8}$$

задающий совместное распределение вероятности обоих разрешаемых альтернатив $p_{ij} = p(a_i, b_j)$.

Представленная модель вероятностного описания событий $\{a_1, a_2\}$ идентична классической вероятностной теории Колмогорова, в силу чего построенный понятийный и математический аппарат для рассмотренного случая является избыточным. Целью его построения является моделирование более широкого класса вероятностных процессов, описание которых невозможно в рамках классической теории вероятности.

2.2.2 Чистые состояния

Представленный выше формализм позволяет моделировать поведенческие алгоритмики, не соответствующие никакому классически-вероятностному описанию событий. Таким алгоритмикам соответствуют, например, операторы $\hat{\rho}$, представимые в виде

$$\hat{\rho} = |\psi\rangle\langle\psi| \leftrightarrow \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} [c_1^* \ c_2^*] = \begin{bmatrix} |c_1|^2 & c_1 c_2^* \\ c_2 c_1^* & |c_2|^2 \end{bmatrix}, \tag{2.9}$$

где

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^{2} c_i |a_i\rangle \leftrightarrow \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}. \tag{2.10}$$

Расчёт, аналогичный (2.10), даёт $p_i = |c_i|^2$, т.е. наблюдаемые вероятности, как и в случае смешанного состояния (2.5), определяются исключительно диагональными элементами матрицы (2.9).

Отличие от нуля недиагональных элементов матрицы плотности проявляется при разрешении разных систем когнитивно-поведенческих альтернатив, размещённых в общем пространстве возможностей. В этом случае, рассмотренные выше системы $\{a_1, a_2\}$ и $\{b_1, b_2\}$ образуют различные базисы такого общего пространства, размерность которого есть не 4, как в модели (2.8), а 2. Базисные вектора $\{b_1, b_2\}$ тогда являются линейными комбинациями векторов $\{a_1, a_2\}$. Может быть, например,

$$\left|b_{1,2}\right\rangle = \frac{|a_1\rangle \pm |a_2\rangle}{\sqrt{2}} \leftrightarrow \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ \pm 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}. \tag{2.11}$$

Согласно (2.1), принятие когнитивно-поведенческой системой решения b_1 есть переход системы в состояние $|\psi\rangle = |b_1\rangle$. Алгоритмика (2.9) последующего разрешения альтернативы $\{a_1, a_2\}$

$$\hat{\rho} = |b_1\rangle\langle b_1| \leftrightarrow \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}. \tag{2.12}$$

даёт $p(a_1) = p(a_2) = 1/2$. При реализации исхода a_1, состояние (2.12) переходит в

$$\hat{\rho} = |a_1\rangle\langle a_1| \leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{2.13}$$

Повторное разрешение альтернативы $\{b_1, b_2\}$ даст теперь $p(b_1) = p(b_2) = 1/2$. Это означает, что в рамках двумерного пространства возможностей системы альтернатив $\{a_1, a_2\}$ и $\{b_1, b_2\}$ не могут быть разрешены *совместно*, т.е. не могут одновременно иметь определённые исходы. Поведенческие эксперименты показывают, что именно такая алгоритмика имеет место во многих поведенческих ситуациях (разд. 3.2).

Данная алгоритмика в корне отличается от алгоритмики максимально смешанных состояний, рассмотренной в разд. 2.2.1. В отличие от последней, алгоритмика чистых состояний есть алгоритмика разрешения неопределённости второго типа (разд. 2.1).

Чистое квантовое состояние *– это алгоритмика разрешения неопределённости второго типа (разд. 2.1).*

В алгоритмике чистого квантового состояния ***опыт*** есть *акт разрешения фундаментальной многовариантности будущего, в ходе которого впервые реализуется один из возможных исходов среди имевшихся ранее в его квантовом состоянии.*

Различное значение опыта в алгоритмиках чистых и смешанных квантовых состояний лежит в основе различия квантовой и классической методологий. Перенесением смысла классического измерения на квантово-физические и поведенческие эксперименты обусловлены многие «парадоксы» квантовой физики и когнитивистики [91, 92].

Чистое состояние (2.10) называется *вектором состояния* поведенческой системы. Состояние $|\psi\rangle$ является объектом того же класса, что и базисные вектора $|a_i\rangle$ и $|b_i\rangle$, выражающие определённые варианты разрешения поведенческих многовариантностей. Линейная комбинация (2.10) называется *суперпозицией* поведенческих альтернатив.

Комплекснозначные коэффициенты c_i разложения (2.10) представляют собой величины проекций вектора состояния $|\psi\rangle$ на базисные векторы используемой системы альтернатив:

$$c_i = \langle\psi|a_i\rangle. \tag{2.14}$$

Числа c_i называются *амплитудами* реализации исхода a_i из поведенческого состояния ψ, или, эквивалентно, амплитудами перехода рассматриваемой системы / процесса в русло a_i. Как показано выше, статистическая вероятность такого перехода есть

$$p_i = |c_i|^2. \tag{2.15}$$

Подчеркнём, что вектор состояния системы $|\psi\rangle$ определён и имеет смысл лишь в отношении конкретной многовариантности; квантовое состояние системы «самой по себе» не имеет смысла [93]. Таким образом в квантовой теории выражается методология целостности и контекстуальности, т.е. неотделимости системы от её окружения (разд. 1.2).

2.2.3 Состояния произвольной чистоты

Формализм, представленный в разд. 2.2.1 и 2.2.2, позволяет моделировать не только алгоритмику чистых и максимально смешанных квантовых состояний, но и промежуточные градации между ними. Таким алгоритмикам соответствуют операторы плотности, недиагональные элементы которых по абсолютной величине уменьшены по сравнению с чистым состоянием. Для двухвариантной неопределённости такое уменьшение можно описать единственным параметром $0 \leq r \leq 1$, добавленным в матрицу плотности (2.9):

$$\hat{\rho}_m(r) = \begin{bmatrix} |c_1|^2 & rc_1c_2^* \\ rc_2c_1^* & |c_2|^2 \end{bmatrix}. \tag{2.16}$$

Эти промежуточные градации представляют собой алгоритмики разрешения неопределённости второго типа (разд. 2.1), *в различной степени частично разрешённой ранее*. Соответствующей количественной мерой является *чистота* квантового состояния, определяемая как

$$P = \mathrm{Tr}[\hat{\rho}^2]. \tag{2.17}$$

В физике процесс разрешения квантовой неопределённости называется разрушением когерентности квантовой суперпозиции, или декогеренцией [94, 95].

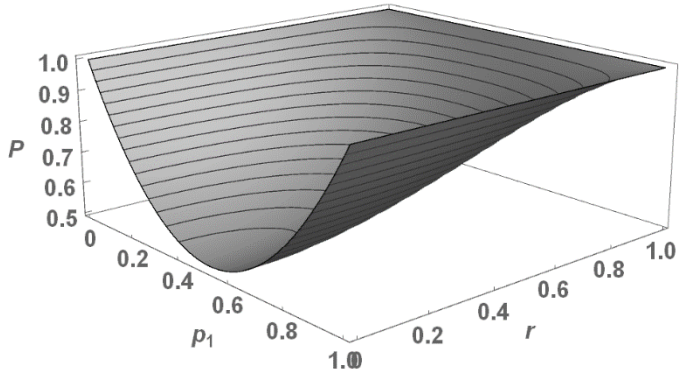

Рисунок 2.1 – Чистота (2.17) *состояния* (2.16) *в зависимости от параметра декогеренции* r.

Рис. 2.1 показывает чистоту (2.17) состояния (2.16) в зависимости от r и $p_1 = |c_1|^2$. Видно, что для отсутствия неопределённости, т.е. $p_1 = 0$ или $p_1 = 1$, чистота есть единица в независимости от r, т.к. в этих случаях недиагональные элементы матрицы плотности равны нулю. В остальных случаях чистота уменьшается с уменьшением r, достигая наименьшего значения ½ при $p_1 = 0.5$ и $r = 0$.

Существуют и другие меры чистоты квантовых состояний. Пример – число Шмидта, равное минимальному количеству чистых состояний, которые необходимо смешать для получения характеризуемого состояния [96].

2.2.4 Запутанные состояния

И физические, и когнитивно-поведенческие процессы и системы могут взаимодействовать друг с другом и в результате взаимообусловиться так, что варианты их дальнейшего развития окажутся неразделимо связанными. В этом случае вовлечённые процессы / системы приобретают совместную алгоритмику разрешения неопределённостей.

Запутанное квантовое состояние систем *– это алгоритмика разрешения неопределённости, определяющая вероятностные закономерности реализации возможных исходов совместного опыта, несводимые к сумме индивидуальных алгоритмик принятия решений.*

Когнитивно-поведенческие системы взаимодействуют посредством обмена информацией – *общения*, в ходе которого происходит обобщение – «запутывание» – поведенческих состояний. Наличие общественного сегмента поведенческих состояний индивидов необходимо для согласованного принятия решений, кооперативной жизнедеятельности и др. [8, гл. 12, 97].

2.3 Геометрическая модель двухвариантной неопределённости

Простейшая ситуация принятия решения A имеет два возможных исхода $|a_1\rangle$ и $|a_2\rangle$, составляющие ортонормированный базис соответствующего гильбертова пространства альтернатив, что выражается тождеством

$$\langle a_i|a_j\rangle = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad i = j, \\ 0, & \text{если} \quad i \neq j. \end{cases} \tag{2.18}$$

В соответствии с (2.10) любой вектор $|\psi\rangle$ в данном пространстве представим в виде

$$|\psi\rangle = e^{i\delta}\left(\cos\frac{\theta}{2}|a_1\rangle + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|a_2\rangle\right), \tag{2.19}$$

где θ, ϕ и δ есть *фазовые параметры* – действительные числа в интервале $[0, 2\pi]$. В настоящее время комплекснозначные множители $e^{i\phi}$ и $e^{i\delta}$ не имеют ясных интерпретаций и измерительных процедур, в связи с чем обычно полагаются равными единице. Дальнейшее изложение следует этой практике, так что предыдущее выражение принимает вид

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|a_1\rangle + \sin\frac{\theta}{2}|a_2\rangle, \tag{2.20}$$

в котором состояние когнитивной системы $|\psi\rangle$ по отношению к неопределённости A характеризуется единственным действительным параметром θ. В соответствии с (2.15), вероятности реализации исходов a_1 и a_2 есть $\cos^2\theta/2$ и $\sin^2\theta/2$ соответственно.

По сравнению с (2.10) параметризация поведенческого состояния (2.20) имеет преимущество наглядной графической интерпретации, показанной на Рис. 2.2. События $|a_1\rangle$ и $|a_2\rangle$ представляются точками, находящимися на единичном расстоянии. Когнитивное состояние $|\psi\rangle$ представляется точкой на окружности, построенной на отрезке a_1a_2 как на диаметре, так что треугольник $\psi a_1 a_2$ является прямоугольным, а угол $\psi o a_1$ равен θ.

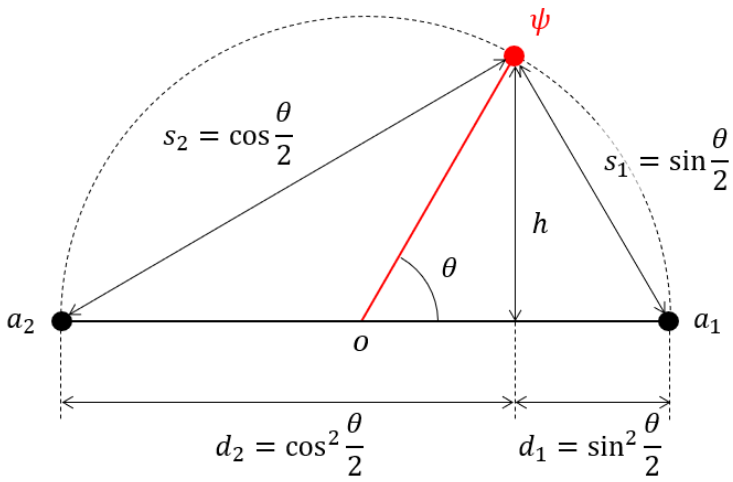

Рисунок 2.2 – Геометрическое представление квантовой модели двухвариантной неопределённости

Амплитуда реализации решения a_1, т.е. перехода $\psi \to a_1$, равная $\langle a_1|\psi\rangle = \cos\theta/2$, совпадает с длиной s_2 отрезка ψa_2. Симметрично, амплитуда перехода $\psi \to a_2$ (реализации исхода a_2) равна длине отрезка ψa_1, $s_1 = \sin\theta/2$. Таким образом, выражение (2.20) можно переписать как

$$|\psi\rangle = s_2|a_1\rangle + s_1|a_2\rangle = h\left(\frac{|a_1\rangle}{s_1} + \frac{|a_2\rangle}{s_2}\right), \tag{2.21}$$

где $h = s_1 s_2$ есть площадь треугольника $\psi a_1 a_2$, численно равная высоте в нём точки ψ. Вероятности реализации исходов a_1 и a_2 есть квадраты амплитуд соответствующих переходов. Эти вероятности численно равны длинам частей диаметра, на которые он делится высотой ψ:

$$p_1 = s_2^2 = d_2, \qquad p_2 = s_1^2 = d_1. \tag{2.22}$$

Если фазовый параметр ϕ не фиксирован, то он представляет собой дополнительную степень свободы состояния $|\psi\rangle$, которое тогда представляется точкой не на окружности, а на сфере, построенной на диаметре $a_1 a_2$, для которой углы θ и ϕ являются полярной и аксиальной координатами. Данная модель, с точностью до радиуса сферы, совпадает с представлением *кубита* на сфере Блоха [98, гл. 1.2].

2.4 Квантовая логика

2.4.1 Классическая логика

Пусть в квадратной коробке имеется светлячок. Логическая структура утверждений $\{1, 2, 3, 4\}$ о нахождении светлячка в одной из четвертей коробки описывается диаграммой Хассе [99, гл. 7.2], показанной на Рис. 2.3 (Б). Эта структура обладает свойством дистрибутивности: для любых утверждений x, y, z выполняется равенство

$$x \wedge (y \vee z) = (x \wedge y) \vee (x \wedge z), \tag{2.23}$$

где $\wedge$ и $\vee$ обозначают операции логических И и ИЛИ.

Утверждения и их связи, показанные на Рис. 2.3 (А) и (Б), образуют дистрибутивную решётку, или булеву логику. Как следствие, на ней можно определить вероятностную меру как площадь части коробки, соответствующей каждому утверждению.

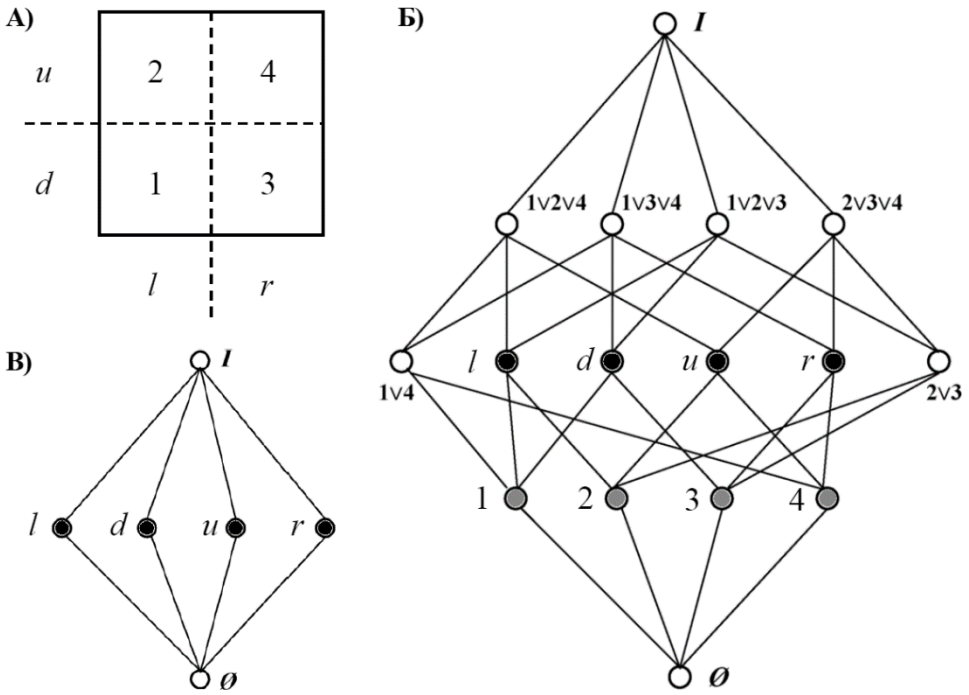

Рисунок 2.3 - А) Элементарные утверждения относительно положения точечного объекта в коробке. Б) Диаграмма Хассе дистрибутивной логической решётки, образуемой элементарными утверждениями $\{1, 2, 3, 4\}$. *В) Диаграмма Хассе утверждений* $\{u, d, l, r\}$

В теории вероятности Колмогорова [89], т.е. классической теории вероятности, вероятностная мера событий p определяется как функция на множестве всех возможных событий, так что теория множеств определяет свойства основанного на ней вероятностного пространства. В данном разделе нам интересны следующие положения теории вероятностей Колмогорова и булевой логики: для любых событий A, B и C имеет место

- *коммутативность*: $p(A \wedge B) = p(B \wedge A)$
  Вероятность реализации событий не зависит от их порядка.
- *монотонность*: $A \supseteq B \Rightarrow p(A) \geq p(B)$
  Если множество событий A включает в себя множество событий B, то вероятность A не меньше вероятности B.
- *дистрибутивность*: $p\big(A \wedge (B \vee C)\big) = p\big((A \wedge B) \vee (A \wedge C)\big)$
  Вероятность события равна сумме вероятностей его реализации по всем возможным путям.

Булева логика представляет собой логику процессов, описываемых классической физикой Ньютона-Эйнштейна [99, с. 67–80, 100, 101], а также является основой теории рационального поведения [16, 17].

2.4.2 Открытие квантовой логики

В начале 20 века было обнаружено, что некоторые физические явления нарушают перечисленные положения булевой логики: результаты физических экспериментов зависят от порядка измерительных процедур, а вероятность комбинации событий может быть больше, чем вероятность событий по отдельности [102]. Вероятности событий с такими свойствами невозможно вписать ни в какое классическое (колмогоровское) вероятностное пространство; для их математического описания создана квантовая механика – теория, представляющая собой альтернативную теорию вероятности [38, гл. 2]. Вместо алгебры множеств булевой логики квантовая логика сопоставляет событиям подпространства в пространстве логических альтернатив [99, гл. 7, 100]. Квантовая теория вероятности выражает многовариантную логику вероятностных процессов, а не булеву логику детерминированных процессов классической физики[1]. Анализ различий соответствующих аксиоматик представлен в работах [21, гл. 2.5, 38, гл. 2].

Спустя 50 лет после создания квантовой теории стало выясняться, что когнитивные процессы нарушают свойства булевой логики и классической теории вероятности, подобно физическим процессам микромира [103–108]. Эти открытия обусловили поиск новых инструментов для их математического описания. В свете упомянутых в разд. 1 квантово-когнитивных аналогий естественной является попытка адаптировать к задачам когнитивистики квантовую теорию – математический аппарат, разработанный в ходе решения подобной задачи в физике.

2.4.3 Нарушение булевой логики в квантовой теории

Простейшая демонстрация не-булевой логики квантовой теории задействует две двухвариантных ситуации неопределённости A и B, потенциальные исходы которых a_1, a_2 и b_1, b_2 размещаются в общем двумерном пространстве возможностей[2]. Классический пример такой пары неопределённостей в физике – это неопределённость проекций магнитного момента (спина) частицы с абсолютной величиной ½ в двух различных направлениях, разрешаемая в опыте Штерна-Герлаха посредством пропускания частицы через неоднородное магнитное поле [98, гл. 1.5.1, 102, гл. 3]. Результатом опытов является отклонение частицы *по* (a_1, b_1) или *против* (a_2, b_2) направлений градиентов магнитных полей (Рис. 2.4). Пара таких опытов над одной и той же частицей может быть выполнена лишь последовательно, т.к. направление градиента

[1] Эквивалентным подходом к построению квантовой теории вероятности является использование в качестве фундамента свойства контекстуальности вероятностных событий, т.е. обусловленности их протекания конфигурацией эксперимента [40, 116, 200].

[2] Правомерность данного предположения в когнитивных экспериментах является актуальным вопросом.

поля в каждом эксперименте однозначно определено конфигурацией установки.

В каждом из двух опытов Штерна-Герлаха состояние неразрешённой неопределённости магнитного момента частицы (снова полагая $e^{i\phi} = 1$) описывается вектором

$$|\psi_\alpha\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|\uparrow_\alpha\rangle + \sin\frac{\theta}{2}|\downarrow_\alpha\rangle, \tag{2.24}$$

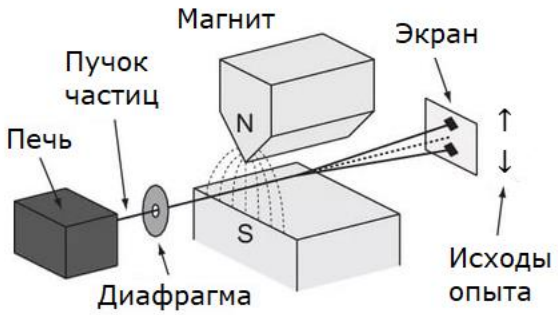

Рисунок 2.4 - Схема опыта Штерна-Герлаха по определению магнитного момента (спина) частиц

где стрелки обозначают возможные исходы опыта, а индекс α есть направление градиента магнитного поля. В экспериментах установлено, что параметр θ в рассматриваемой ситуации есть угол между направлением α и исходной ориентацией спина частицы, приготавливаемой в предварительном опыте Штерна-Герлаха [102, гл. 3]. Это обстоятельство позволяет рассматривать исходы опытов с различными направлениями магнитного поля в общем двумерном пространстве возможностей.

Обозначим α угол между направлениями градиентов магнитного поля в последовательных опытах Штерна-Герлаха и примем за ноль направление градиента магнитного поля в опыте A. Исходы опыта A $|\uparrow_0\rangle$ и $|\downarrow_0\rangle$ и исходы опыта B $|\uparrow_\alpha\rangle$ и $|\downarrow_\alpha\rangle$ по-прежнему будем обозначать векторами $|a_1\rangle, |a_2\rangle, |b_1\rangle, |b_2\rangle$. Геометрическая модель данной конфигурации опытов для случая $\alpha = 45°$ и спина, приготовленного в состоянии $\theta = 90°$ относительно направления опыта A, показана на Рис. 2.5.

Пусть первым проводится опыт A; тогда, высота треугольника $\psi a_1 a_2$ делит диаметр $a_1 a_2$ пополам, что означает равновероятность исходов a_1 и a_2. Если перед опытом A провести опыт B, то в соответствии с Рис. 2.5 исходы b_1 и b_2 будут получены с вероятностями $\cos^2 45°/2 \approx 0.85$ и $\sin^2 45°/2 \approx 0.15$ соответственно. Теперь (без отсева по исходам опыта B), вероятности исходов a_1 и a_2 последующего опыта A равны 0.75 и 0.25. Таким образом, в результате проведения промежуточного эксперимента B, соотношение вероятностей исходов a_1 и a_2 изменилось от $1/1$ до $3/1$.

Кроме того, имеют место следующие неравенства:

1. $p[a_1, b_1] \approx 0.5 * 0.85 = 0.425 \neq p[b_1, a_1] = 0.85 * 0.85 \approx 0.72$;
2. $p[b_1, a_1] \approx 0.72 > p[a_1] = 0.5$;
3. $p[a_1] = 0.5 \neq p[b_1, a_1] + p[b_2, a_1] = 0.75$.

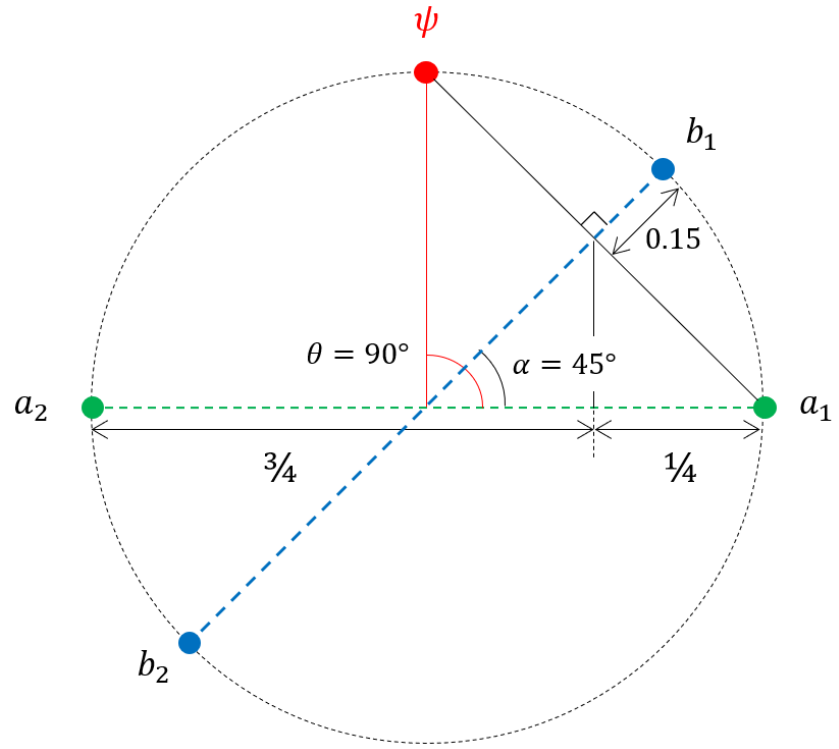

Рисунок 2.5 - Схема квантовой модели последовательного разрешения пары двухвариантных альтернатив

Легко видеть что данные предсказания квантовой теории противоречат положениям классической теории вероятности, приведённым в начале раздела, а именно свойствам коммутативности, монотонности и дистрибутивности; описываемая квантовой теорией вероятности логика событий a_1, b_1, a_2, b_2 не является булевой.

В квантовой логике события a_1, b_1, a_2, b_2 являются первичными наблюдаемыми исходами и не имеют составных частей; при переобозначении

$$\{a_1, a_2\} \to \{r, l\}, \qquad \{b_1, b_2\} \to \{u, d\} \tag{2.25}$$

они образуют логическую решётку, показанную на Рис. 2.3 (В), что особенно наглядно для значения $\alpha = 90°$; в действительности, это верно для любого $\alpha \neq 0$ [99, гл. 7].

Утверждения $\{u, d, l, r\}$ входят в булеву решётку, построенную на элементарных утверждениях $\{1, 2, 3, 4\}$ (Рис. 2.3 (Б)), в составе которой утверждение $l \wedge d$ соответствует утверждению 1. В квантовой логике утверждение 1 отсутствует, т.к. оно соответствовало бы одновременному разрешению альтернатив $\{l,\ r\}$ и $\{u,\ d\}$, что на практике невозможно. Поэтому $l \wedge d = \emptyset$: $\emptyset$ (всегда ложно) есть максимальное корректное утверждение, содержащееся одновременно в l и в d. Аналогично, $l \vee d = \mathbb{I}$: $\mathbb{I}$ (всегда истинно) есть минимальное корректное утверждение, содержащее l и d [99, гл. 7, 109].

В отличие от Рис. 3.4 (Б), решётка на Рис. 2.3 (В) не является дистрибутивной, так как

$$r \wedge (u \vee d) = r \wedge \mathbb{I} = r \neq \emptyset = \emptyset \vee \emptyset = (r \wedge u) \vee (r \wedge d). \qquad (2.26)$$

Следовательно, логика этой решётки не является булевой и для входящих в неё утверждений определить классическую вероятностную меру невозможно.

2.4.4 Квантовая логика в макроскопических системах

Квантовая логика не является исключительным свойством микромира. Она может быть воспроизведена в макроскопических механических системах, в частности, на основе схем, показанных на Рис. 2.2 и Рис. 2.5, когда состояние системы характеризуется положением точки на окружности. Для этого достаточно реализовать следующий алгоритм принятия двухвариантного решения:

1. Альтернативные варианты развития системы сопоставляются диаметральным точкам окружности;
2. Точка, описывающая состояние системы, перемещается на этот диаметр по перпендикуляру;
3. На диаметре с равномерной плотностью вероятности выбирается случайная точка и делит диаметр на две части;
4. Точка, описывающая состояние системы, перемещается на окружность по той части диаметра, на которой она оказалась;
5. Результирующее положение системы представляет собой принятое решение.

Эта и другие реализации квантовой логики в макроскопических системах обсуждаются в работах [35, 99, гл. 8, 110–112].

2.5 Задания для самопроверки и дополнительной работы

1. Дать определения и проиллюстрировать на примерах следующие понятия:
   - квантовое состояние процесса / системы
   - запутанное квантовое состояние процессов / систем
   - измерение, опыт, коллапс квантового состояния
   - логика, булева логика, квантовая логика
   - модель

2. Установить, к какому времени могут относиться неопределённостей двух типов, описанные в разд. 2.1. Где возможно, примести примеры неопределённостей, относящихся к прошлому, настоящему и будущему времени.

3. Ознакомиться с подходами к квантовому моделированию смысловой многозначности языка. Изучить схему семантического моделирования «Состояние-Контекст-Свойство» (SCOP, разд. 1.4.3), соотнести её с поведенческой схемой «Стимул-Организм-Ответ». Сконструировать примеры

смысловой многозначности языка, построить её качественную модель на основе понятийного и математического аппарата квантовой теории.

4. Найти аналитический вид функции, показанной на Рис. 2.1.

5. Определить соотношение и выявить принципы взаимодействия объективной логики физических процессов и субъективной логики естественных когнитивных систем, и в частном случае - человека.

6. Показать, что вероятности исходов при последовательном принятии двухвариантных решений могут быть рассчитаны с помощью последовательного проектирования квантового состояния системы на направления принятия решений, как показано на Рис. 2.5.

7. В продолжение разд. 2.4.4 изучить известные и сконструировать новые физические схемы, реализующие квантовую логику в макроскопических системах.

Дополнительные материалы:
[91, 92, 94, 95, 98, 100, 109, 110, 113–126].

3. КВАНТОВЫЕ МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

3.1 Задача моделирования поведения человека

Индивидуальное и коллективное поведение человека является объектом исследований ряда научных дисциплин, начиная от физиологии высшей нервной деятельности и психологии, заканчивая социологией и кибернетикой. Существующие взгляды на моделирование поведения живых организмов вообще и человека в частности можно классифицировать следующим образом:

– Поведение организма есть результат соответствующего вычисления в его нервной системе, которое может быть промоделировано;
– Поведение организма есть проявление физической активности нервной системы, которая в некоторой степени может быть промоделирована некоторой совокупностью вычислений;
– Поведение человека невозможно объяснить в физических, математических и вообще научных терминах.

Наибольшую поддержку научного сообщества находит вторая точка зрения [21, 38, 127–129].

Трудность создания теории поведения человека выражается так называемой теоремой Гёделя о неполноте, исключающей возможность создания формальной логической системы, которой было бы достаточно для доказательства всех истинных теорем элементарной арифметики; из данной теоремы следует, что способность человека к пониманию процессов природы невозможно свести к непротиворечивой системе логических правил [127, 130, 131].

Данное фундаментальное ограничение не означает невозможности статистического моделирования поведенческих закономерностей: во многих случаях с данной задачей успешно справляется классическая поведенческая психология [13, 132]. Поведенческие феномены не описываемые классической поведенческой психологией также имеют статистические закономерности, известные как *когнитивные искажения* [133–135].

Понимание механизмов возникновения когнитивных искажений, их описательное и прогностическое моделирование является целью современных когнитивных исследований. Вероятностное статистическое моделирование когнитивных искажений является центральной задачей *квантовой когнитивистики* – научной дисциплины, решающей задачу моделирования когнитивных искажений с помощью математического аппарата квантовой теории [21, 38, 61, 136].

3.2 Экспериментальные результаты

3.2.1 Дилемма заключённого

Классическим поведенческим экспериментом по наблюдению когнитивных искажений является так называемая *дилемма заключённого* [17].

Дилемма заключённого формулируется следующим образом. Двух подозреваемых по серьезному делу берут под стражу, но у прокурора нет весомых доказательств против них. Подозреваемых изолируют друг от друга и каждому предлагают признаться в преступлении, обещая послабление наказания за сотрудничество. Заключённым известно:

– Если оба обвиняемых будут молчать, прокурор обвинит их в каком-либо небольшом преступлении, например, в мелкой краже, и даст обоим небольшое наказание;

– Если оба подозреваемых обвинят друг друга, их будут судить за серьезное преступление, но прокурор не будет настаивать на максимальном наказании.

– Если же один подозреваемый обвинит другого, который будет молчать, то обвинившего отпустят, а молчавший получит максимальное наказание.

Таблица выигрышей (обратных величине наказания) в данной ситуации принятия решений показана в Табл. 3.1.

Таблица 3.1 Формализация «дилеммы заключённого» в теории игр. В паре выигрышей, первое число относится к игроку 1, второе – к игроку 2. Значения выигрышей удовлетворяют неравенству $B < D < A < C$

		Игрок 2	
		Действие 0_2 (молчать)	Действие 1_2 (обвинить)
Игрок 1	Действие 0_1 (молчать)	A, A	B, C
	Действие 1_1 (обвинить)	C, B	D, D

Равновесием Нэша в данной игре является пара стратегий $1_1 1_2$, поскольку ни один из игроков не может увеличить выигрыш, который она обеспечивает, в одностороннем порядке меняя свою стратегию [137]. Именно к этому решению стремится игра, участники которой *рациональны*.

Пара решений $0_1 0_2$ обеспечивает максимальный суммарный выигрыш, причём выигрыш каждого из игроков не может быть увеличен без уменьшения выигрыша другого; такая пара является парето-оптимальной или оптимальной по Парето.

«Дилемма» заключается в том, что равновесие Нэша не является парето-оптимальным; для достижения парето-оптимальности необходимо отклонение участников от (индивидуально) рациональных стратегий. Такое

отклонение систематически наблюдается в экспериментах [138–141], результаты которых представлены в Табл. 3.2.

Таблица 3.2 Вероятность принятия участником дилеммы заключённого решения о предательстве в зависимости от информации о решении партнёра [142]

Работа	**Партнёр предал**	**Партнёр молчит**	**Решение партнёра неизвестно**
Шафир и Тверский [138]	0.97	0.84	0.63
Кросон [139]	0.67	0.66	0.60
Ли и Таплан [141]	0.91	0.84	0.66
Бузмеер [143]	0.84	0.66	0.55
Бузмейер [142]	0.81	0.65	0.57

3.2.2 Эффект порядка

Вероятность конкретного исхода при последовательном разрешении многовариантностей A и B зависит от их порядка. Феномен не согласуется со свойством коммутативности теории множеств (разд. 2.4), в силу чего не может быть описан в рамках классической теории вероятности.

3.2.2.1 Классический эксперимент [144]

Опросы общественного мнения 1995 и 1997 г. о политических деятелях США.

Вопрос A: «Считаете ли вы Б. Клинтона честным и благонадёжным?»

Вопрос B: «Считаете ли вы А. Гора честным и благонадёжным?»

Если вопрос шёл первым в паре, то вероятности положительных ответов:

$p(A) = 50\%, p(B) = 68\%.$

Если вопрос шёл вторым в паре, то вероятности положительных ответов:

$p(A) = 57\%, p(B) = 60\%.$

3.2.2.2 Корреляция эффектов порядка [145]

Обозначим возможные варианты разрешения альтернатив A и B как A_1, A_2, B_1, B_2. Пусть $p(A_i, B_j)$ есть вероятность последовательной реализации исходов A_i и B_j. Обнаружено, что эти величины подчиняются квантово-теоретическому соотношению [146, 147]:

$$[p(A_1, B_2) - p(B_2, A_1)] = -[p(A_2, B_1) - p(B_1, A_2)]. \qquad (3.1)$$

Анализ 70 опросов общественного мнения (полное число участников более 100 тысяч), в каждом из которых изучался эффект порядка двух дихотомических вопросов, показал, что экспериментальная корреляция выражений в квадратных скобках равна -0.82, что близко к квантово-теоретическому ожиданию -1.

3.2.2.3 Релевантность поисковой выдачи [148]

Эффект порядка отображаемых документов имеет место в оценке пользователем релевантности выдачи поисковых систем.

3.2.3 Ошибка конъюнкции

Вероятность совместной реализации пары событий A и B выше, чем вероятность реализации одного из них (B). Феномен не согласуется со свойством монотонности классической теории вероятности (разд. 2.4), т. к. пересечение множеств A и B не может быть больше, чем любое из исходных.

3.2.3.1 *Классический эксперимент* [149]

На основании краткого досье *«Линде 31 год. Она не замужем, за словом в карман не лезет и очень сообразительная. Она училась на факультете философии. Студенткой много размышляла о дискриминации и социальной несправедливости, участвовала в демонстрациях против распространения ядерного оружия»*, студенты бизнес школы стэндфордского университета, проходящие курс по принятию решений, оценивали, какое из утверждений более вероятно:

A: «Линда – активная феминистка»

B: «Линда – кассир в банке»

Результат: 85% опрошенных дали ответ, что $p(A \text{ и } B) > p(B)$ [149].

3.2.3.2 Политическое прогнозирование [149]

Опрос участников 2го международного конгресса по прогнозированию в 1982 г. (профессиональные аналитики). Какое событие более вероятно:

A: «В 1983 г. СССР нападут на Польшу»

B: «В 1983 г. США разорвут дипломатические отношения с СССР».

Результат: $p(A \text{ и } B) = 0.47\%$, $p(B) = 0.14\%$.

3.2.3.3 Скрытое утверждение [150]

Испытуемым (дети) показывали коробку с деревянными кубиками, большинство из которых коричневые, а два – белые. Вопрос – каких кубиков больше: коричневых (A и B), или деревянных (B).

Результат: дети до 8 лет дают ответ, что больше коричневых, а дети старше 8 лет – что больше деревянных.

3.2.4 Нарушение принципа определённости

Принцип определённости («Sure thing principle» [151]): если решение A принимается при условии B, и решение A принимается при условии не-B, то решение A должно приниматься при отсутствии информации о состоянии условия B.

Принцип определённости представляет собой частный случай закона полной вероятности в классической теории вероятности [152–154].

Закон полной вероятности:

Пусть вероятность события A равна $p(A)$, и $\{B_1, B_2\}$ – множество несовместимых условий, одно из которых верно, т.е. сумма их вероятностей $p(B_1) + p(B_2) = 1$. Тогда, если $p(A|B_i)$ – вероятность события A при условии B_i, то

$$p_{\text{класс}}(A) = p(A|B_1) * p(B_1) + p(A|B_2) * p(B_2). \qquad (3.2)$$

Данное равенство выражает собой аксиому дистрибутивности в классической логике и теории вероятности Колмогорова (разд. 2.4) [38, с. 24, 89].

3.2.4.1 Игра в кости [152]

Человек принимает решение об участии в следующем коне игры в кости (событие A). Если известно, что предыдущий кон выигран (B_1) / проигран (B_2), то вероятность положительного решения составляет $p(A|B_1) = 0.69$ и $p(A|B_2) = 0.59$ соответственно. Если же исход предыдущего кона равновероятно неизвестен, $p(B_1) = p(B_2) = 0.5$, то вероятность положительного решения составляет $p(A) = 0.36$, что расходится с предсказанием (3.2): $36\% \neq 59\% * 0.5 + 69\% * 0.5 = 64\%$.

3.2.4.2 Каникулы после экзаменов [152]

Студент принимает решение о бронировании туристической поездки, которая может состояться после сдачи экзаменов. После известия о положительном / отрицательном результате экзамена вероятность бронирования составляет $p(A|B_1) = 0.54$ и $p(A|B_2) = 0.57$ соответственно. Если же исход экзамена равновероятно неизвестен, то в нарушение (3.2) вероятность бронирования составляет $p(A) = 0.32$.

3.2.4.3 Дилемма заключённого [142]

Человеку представлен выбор: молчать или предать напарника, причём независимо от решения напарника, рационально выгодно предательство (разд 3.2.1).

Если известно, что напарник сделал выбор «Предательство» (B_1) или «Молчание» (B_2), то человек принимает решение молчать с вероятностью $p(A|B_1) = 0.16$ и $p(A|B_2) = 0.34$. Если решение напарника равновероятно неизвестно, то вероятность принять решение «Молчать» равна $p(A) = 0.45$.

3.3 Модели дискретной когнитивной динамики

Математический аппарат, изложенный в разд. 2, является основой большинства существующих моделей в квантовой когнитивистике. Несмотря на свою простоту эта математическая структура находится за рамками классической логики и теории вероятности, и, как таковая, достаточна для моделирования многих когнитивных искажений [61, 136, 155]. Далее в этом разделе представлена квантовая модель, описывающая экспериментальные результаты, приведённые в разд. 3.2.

3.3.1 Классические модели

Наиболее успешной не-квантовой моделью, позволяющей моделировать описанные ситуации принятия рискованных решений является эвристическая *теория перспектив* Д. Канемана [18, 156]. Согласно данной теории нерациональность агентов в многоходовых решениях есть следствие изменения его функции полезности как результат промежуточных решений. Сравнительный анализ на примере задачи об игре в кости показал, что при одинаковом числе свободных параметров (3) квантово-подобная модель превосходит в точности классическую: последняя даёт $R^2 \approx 0.79$ против $R^2 \approx 0.83$ для квантовой модели; сравнение по фактору Байеса выявило, что квантовая модель является предпочтительной для описания 83%-90% испытуемых [157].

В целом, моделирование процесса принятия решений в рамках классической теории вероятности автоматически наследует выполнение закона полной вероятности, и, таким образом, в принципе не может описать отклонение от закона дистрибутивности булевой логики [146, 147, 158–160].

3.3.2 Квантовое моделирование эффектов порядка и ошибки конъюнкции

Следуя разд. 2 сопоставим когнитивному состоянию респондента и ответам A_1, A_2 и B_1, B_2 вектора $|a_1\rangle, |a_2\rangle, |b_1\rangle, |b_2\rangle$ в общем двумерном пространстве квантовых состояний, как показано на Рис. 3.1: все вектора начинаются в одной точке и имеют единичную амплитуду, поэтому концы векторов, показанные точками, лежат на единичной окружности. Углы θ и ϕ характеризуют смысловое отношение вопросов и когнитивное состояние человека по отношению к ним. Стрелки соответствуют переходам между состояниями, вероятности переходов между которыми приведены на картинке в аналитическом виде.

Эффект порядка в экспериментах 1 и 2 соответствует тому, что вероятность получения ответа A_1 зависит от того, дан ли предварительно ответ B_1, и наоборот. В описанной квантовой картине вероятность получения ответа A_1 есть

$$p(A_1) = \cos^2 \frac{\phi}{2}, \tag{3.3}$$

а вероятность получения ответа A_1 после получения ответа B_1 равна вероятности перехода из когнитивного состояния $|\psi\rangle$ в состояние $|a_1\rangle$, умноженная на вероятность перехода из $|a_1\rangle$ в состояние $|b_1\rangle$:

$$p(B_1, A_1) = \cos^2 \frac{\phi - \theta}{2} * \cos^2 \frac{\theta}{2}. \tag{3.4}$$

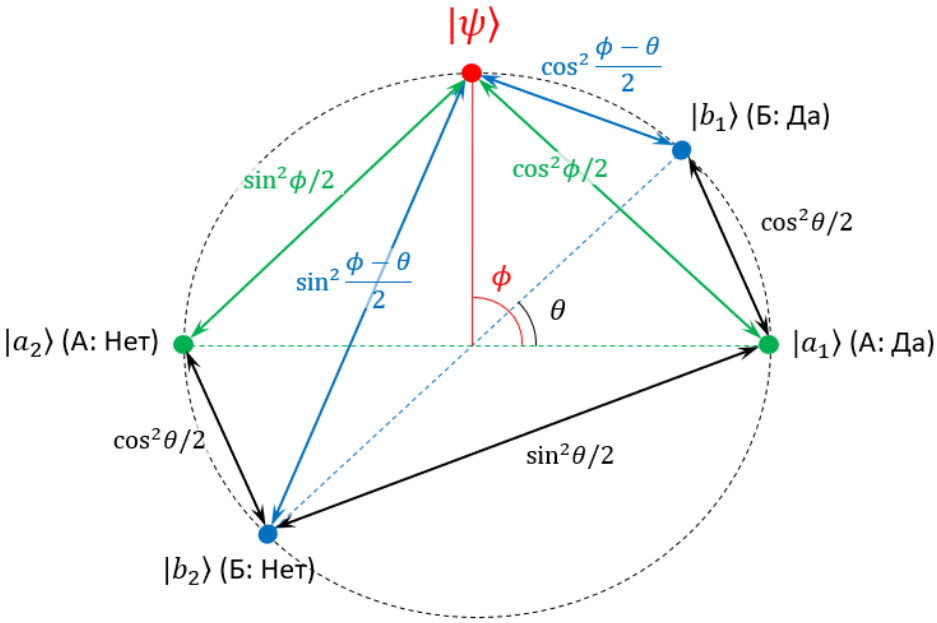

Рисунок 3.1 – Схема квантово-подобной модели последовательного разрешения двоичных альтернатив А и Б

Величина (3.4) может быть как меньше, так и больше $p(A_1)$. В первом случае, что соответствует $\theta \in (0, \phi)$, кроме эффекта порядка имеет место также ошибка конъюнкции. Подобное моделирование является наиболее точным среди подходов, известных сегодня [161].

3.3.3 Квантовое моделирование нарушений закона полной вероятности

Когнитивное состояние человека, решения A и события B_1, B_2 сопоставляются векторам $|\psi\rangle, |a\rangle, |b_1\rangle, |b_2\rangle$ в пространстве квантовых состояний (разд. 2). Вероятность принятия решения $|a\rangle$ из когнитивного состояния $|\psi\rangle$ есть квадрат модуля от проекции вектора $|a\rangle$ на вектор $|\psi\rangle$:

$$p(A) = |\langle\psi|a\rangle|^2. \tag{3.5}$$

В силу условия $\sum_i p(B_i) = 1$, что соответствует тождесту $\sum_i |b_i\rangle\langle b_i| = \hat{1}$, амплитуда $\langle\psi|a\rangle$ выражается через амплитуды переходов $\langle b_i|a\rangle$ и амплитуды вероятности событий B_i $\langle\psi|b_i\rangle$ как

$$\langle\psi|a\rangle = \sum_i \langle\psi|b_i\rangle\langle b_i|a\rangle, \tag{3.6}$$

Соотношение (3.6) является квантовым аналогом закона полной вероятности – законом *полной амплитуды* [21, с. 50]. Его подстановка в предыдущее выражение с учётом равенств $|\langle b_i|a\rangle|^2 = p(A|B_i)$, $|\langle\psi|b_i\rangle|^2 = p(B_i)$ даёт квантовое обобщение закона полной вероятности

$$p_{\text{квант}}(A) = p(A|B_1) * p(B_1) + p(A|B_2) * p(B_2) + 2\delta * \cos\phi, \tag{3.7}$$

где последнее слагаемое – т.н. интерференционный член, в котором

$$\delta = \sqrt{p(A|B_1) * p(B_1) * p(A|B_2) * p(B_2)} \tag{3.8}$$

есть амплитуда интерференции, а её фаза есть

$$\phi = \mathrm{Arg}[\langle\psi|b_1\rangle\langle b_1|a\rangle\langle\psi|b_2\rangle^*\langle b_2|a\rangle^*]. \tag{3.9}$$

Из квантового закона полной вероятности (3.7) имеем [73]

$$\cos\phi = \frac{p(A) - p(A|B_1) * p(B_1) - p(A|B_2) * p(B_2)}{2\delta}. \tag{3.10}$$

В случае, если последнее уравнение имеет решение (правая часть по модулю не превосходит единицы), квантово-подобная модель позволяет точно описать экспериментальные результаты благодаря подстройке значения фазы ϕ.

3.3.4 Управление когнитивно-поведенческой системой

Рассмотрим когнитивно-поведенческую систему в контексте пары взаимоисключающих альтернатив $|\uparrow_0\rangle$ и $|\downarrow_0\rangle$, находящегося в квантовом состоянии $|\psi_0\rangle = |\uparrow_0\rangle$. Пусть наша задача – добиться того, чтобы система (объект) приняла решение $|\downarrow_0\rangle$, противоположное её текущему состоянию. В классической логике подобная манипуляция состоянием системы с помощью одних лишь измерений невозможна; квантово-подобный подход к задаче, однако, предлагает решение.

Выберем в рассматриваемом когнитивно-поведенческом пространстве N дополнительных контекстов принятия решений, соответствующих базисам $\{|\uparrow_i\rangle, |\downarrow_i\rangle\}$, ориентированных как показано на Рис. 3.2: вектора $|\uparrow_i\rangle$ расположены в интервале между $|\uparrow_0\rangle$ и $|\downarrow_0\rangle$ с постоянным угловым шагом $\Delta\theta = \pi/(N+1)$.

Дополнительные контексты последовательно предлагаются объекту для принятия решений. После первого промежуточного решения квантовое состояние объекта описывается матрицей плотности

$$\hat{\rho}_1 = \cos^2\frac{\Delta\theta}{2}|\uparrow_1\rangle\langle\uparrow_1| + \sin^2\frac{\Delta\theta}{2}|\downarrow_1\rangle\langle\downarrow_1|. \tag{3.11}$$

В случае положительного решения $|\uparrow_1\rangle$ вероятность реализации которого есть $\cos^2\frac{\Delta\theta}{2}$, объекту предлагается принять решение в следующем контексте $\{|\uparrow_2\rangle, |\downarrow_2\rangle\}$, и так далее для остальных промежуточных контекстов. Вероятность положительного решения $|\uparrow_N\rangle$ в последнем из них составит

$$p_N = \left(\cos^2\frac{\Delta\theta}{2}\right)^N. \tag{3.12}$$

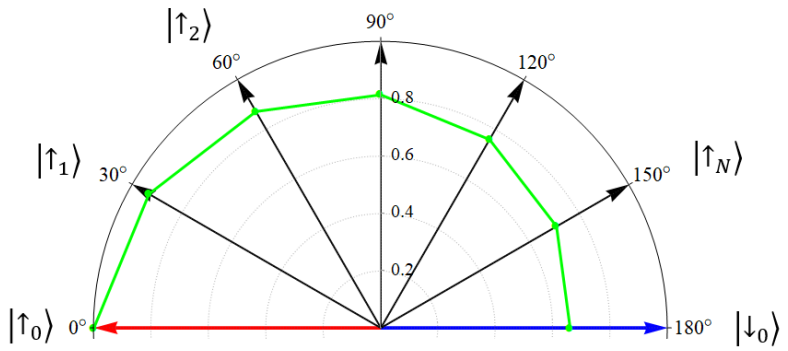

Рисунок 3.2 – Моделирование управления когнитивно-поведенческим состоянием объекта на принципах квантовой теории. Целевое решение $\{|\uparrow_0\rangle, |\downarrow_0\rangle\}$ дополнено N промежуточными экспериментами, принятие решений $\{|\uparrow_i\rangle, |\downarrow_i\rangle\}$ в которых вероятностно-предопределённым образом модифицирует когнитивно-поведенческое состояние объекта

После такой серии промежуточных решений к целевому контексту подошло когнитивно-поведенческое состояние $|\uparrow_N\rangle$, причём угол между направлением $\uparrow_N$ и целевым исходом $\downarrow_0$ равен $\Delta\theta$. Финальное решение даст результат

$$\hat{\rho}_{N+1} = p_N \left(\cos^2 \frac{\Delta\theta}{2} |\downarrow_0\rangle\langle\downarrow_0| + \sin^2 \frac{\Delta\theta}{2} |\uparrow_0\rangle\langle\uparrow_0| \right) \tag{3.13}$$

Таким образом, поставленная задача - перевод объекта из исходного когнитивно-поведенческого состояния $|\uparrow_0\rangle$ в противоположное состояние $|\downarrow_0\rangle$ - решена с вероятностью успеха

$$p(N) = p_{N+1} = \left(\cos \frac{\pi/2}{N+1} \right)^{2(\mathrm{N}+1)} . \tag{3.14}$$

Для $N = 5$ и $\Delta\theta = 180°/(N+1) = 30°$, это выражение даёт $p(5) = 0.66$.

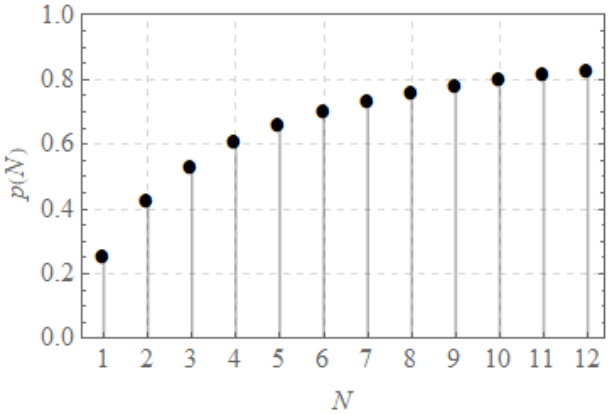

Рисунок 3.3 – Вероятность успешного завершения цикла управления когнитивно-поведенческим состоянием объекта (Рис. 3.2) в зависимости от количества промежуточных шагов

Зависимость $p(N)$ показана на Рис. 3.3; это – возрастающая функция, стремящаяся к единице. Это значит, что при возможности проведения объекта через необходимое число промежуточных когнитивно-поведенческих

состояний, объект можно вероятностно-предопределённым образом перевести в противоположное (или в любое другое) когнитивно-поведенческое состояние с любой требуемой надёжностью.

Представленная стратегия представляет собой решение задачи динамического программирования по отношению к целевой когнитивно-поведенческой системе с применением концепции контекстно-обусловленной актуализации возможностей (разд. 1.4.2). Таким образом математический аппарат квантовой теории позволяет моделировать «неклассические» стратегии управления, в которых инструментом управления является не прямое воздействие на объект управления в заранее заданных обстоятельствах (контекстах), но конструирование последовательностей когнитивно-поведенческих альтернатив при предоставлении объекту управления полной «свободы выбора».

Полученный результат является верным для когнитивно-поведенческих систем с любой размерностью пространства состояний. Для приведения произвольной когнитивно-поведенческой системы в требуемое состояние, необходимо выбрать в её пространстве состояний траекторию перехода и осуществить на ней набор актов принятия решений в последовательно предъявляемых контекстах с шагом, определяемым требуемой вероятностью успеха. Данная методика в применении к когнитивным состояниям социальных систем известна под названием «Окна Овертона» [162–164]. Предполагается, что подобным образом может быть описана эволюция состояния любой системы в природе [39, 165].

В физике управление квантовым состоянием системы (в пассивном варианте) известно как «квантовый эффект Зенона». Данный эффект позволяет, например, удержать возбуждённое состояние атома от релаксации с помощью постоянного «наблюдения» за ним [166–168]. Аналогичный эффект был экспериментально установлен для когнитивных систем. В недавнем эксперименте [169] судье предлагалось оценивать степень виновности подсудимого в ситуации, когда последний изначально считается невиновным, а свидетельства виновности доводятся до внимания судьи пошагово. Обнаружено, что в случае, когда судья обязан выносить решения после добавления каждой порции свидетельств, вероятность итогового суждения «невиновен» выше, чем в случае, когда судья выносит единственное суждение по рассмотрении всех свидетельств вместе.

3.4 Модели непрерывной когнитивной динамики

В представленных до сих пор моделях отклонения от классической теории вероятности описываются за счёт квантово-подобного преобразования когнитивного состояния субъекта при изменении контекста ситуации выбора, определяющего базис когнитивно-поведенческого пространства. Последовательность таких преобразований составляет дискретную динамику когнитивного состояния, индуцированную актами принятия решений, между которыми когнитивное состояние субъекта статично. Далее представлен краткий обзор существующих моделей, в которых имеет место не дискретная, а

непрерывная эволюция когнитивного состояния, которую можно ассоциировать с процессом мышления принимающего решение субъекта.

3.4.1 Гамильтонова динамика когнитивных состояний

В этом подходе эволюция когнитивного состояния $|\psi\rangle$ описывается с помощью уравнения Шрёдингера

$$i\frac{d}{dt}|\psi\rangle = \widehat{H}|\psi\rangle, \tag{3.15}$$

в котором $\widehat{H}$ есть оператор энергии рассматриваемой системы (гамильтониан) [7]. Общее решение этого уравнения

$$|\psi(t)\rangle = \exp\left[-i\widehat{H}t\right]|\psi(0)\rangle \tag{3.16}$$

отличается от дискретного преобразования когнитивного состояния $|\psi\rangle \to \widehat{U}|\psi\rangle$ тем, что оператор эволюции

$$\widehat{U} = \exp\left[-i\widehat{H}t\right] \tag{3.17}$$

теперь зависит от времени, что позволяет моделировать не только финальный результат принятия решения, но и его динамику.

3.4.2 Динамическое моделирование дилеммы заключённого

Примерами вышеописанного подхода являются динамические модели принятия решений в «дилемме заключённого» (разд. 3.2.1) [142, 170]. В данной игре каждый из участников A и B имеет по два возможных решения $|0\rangle$ и $|1\rangle$, составляющие базисы их поведенческих пространств. Совместное поведенческое состояние двух игроков описывается вектором в объединённом поведенческом пространстве, базисом которого являются вектора $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$, соответствующие всем возможным парам решений:

$$|\Psi\rangle = c_{00}|00\rangle + c_{01}|01\rangle + c_{10}|10\rangle + c_{11}|11\rangle. \tag{3.18}$$

Парное поведенческое состояние $|\Psi\rangle$ может являться произведением индивидуальных состояний субъектов, в каком случае

$$\begin{gathered}|\Psi\rangle_{\text{разд}} = |\mathrm{A}\rangle\otimes|\mathrm{B}\rangle = (a_0|0\rangle_A + a_1|1\rangle_A)\otimes(b_0|0\rangle_\mathrm{B} + b_1|1\rangle_B) = \\ a_0b_0|00\rangle + a_0b_1|01\rangle + a_1b_0|10\rangle + a_1b_1|11\rangle.\end{gathered} \tag{3.19}$$

В разделимом (сепарабельном, факторизуемом) состоянии (3.19) вероятности решений субъектов определены их собственными поведенческими состояниями $|\mathrm{A}\rangle$ и $|\mathrm{B}\rangle$. Если $c_{ij} \neq a_ib_j$, то состояние (3.18) разделимым не является. В этом случае (3.18) есть поведенческое состояние субъектов, в котором их решения скоррелированы подобно исходам измерений над частями

двухсоставной системы в экспериментах по нарушению неравенства Белла [118, 171, 172], и называется «запутанным» (разд. 2.2.4).

Таким образом, аппарат запутанных состояний квантовой теории может быть использован для моделирования кооперативного принятия коллективных решений. Например, можно подобрать гамильтониан парной системы $\widehat{H}$, такой что динамика (3.15) подавляет в совместном поведенческом состоянии амплитуды $|01\rangle$ и $|10\rangle$, одновременно увеличивая амплитуды $|00\rangle$ и $|11\rangle$:

$$\widehat{H} = i\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \longrightarrow \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} c_{00} \\ c_{01} \\ c_{10} \\ c_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{00} + c_{10} \\ -c_{01} + c_{11} \\ -c_{10} + c_{00} \\ c_{01} + c_{11} \end{bmatrix}. \tag{3.20}$$

Данный подход позволил осуществить моделирование кооперативного поведения субъектов в «дилемме заключённого». При этом установлено соответствие между компонентами гамильтониана когнитивной динамики и различными поведенческими мотивами [142, 170]; показано, что для моделирования нарушения закона полной вероятности (разд. 3.2.4) необходимо наличие нерациональной компоненты, направленной (предположительно) на устранение когнитивного диссонанса в психике субъекта[1] [173].

Динамика (3.15) может быть дополнена взаимодействием поведенческого состояния с внешней средой, моделирующей информационное окружение когнитивно-поведенческих систем [170]. Возможно её обобщение на случай произвольного числа субъектов [174].

3.4.3 Модели случайного блуждания

Эволюция квантово-подобного состояния может быть сформулирована как динамика «случайного блуждания» (random walk) системы / процесса по решётке состояний / русел (Рис. 1.1), составляющих базис рассматриваемого когнитивно-поведенческого пространства. В картине случайных блужданий, квантово-подобная система / процесс может находиться в состоянии многовариантности будущего, т.е. в суперпозиции различных вариантов дальнейших событий, тогда как классическая система фактически находится в определённой ячейке на решётке состояний. Несмотря на концептуальную эквивалентность стандартного динамического описания и картины случайных блужданий, последняя в некоторых случаях ближе к интуитивному представлению моделируемого явления.

В отличие от классических моделей случайного блуждания квантово-подобные модели оперируют не вероятностями (действительного) нахождения системы на решётке состояний, а амплитудами их (потенциального)

[1] Когнитивный диссонанс – психологический дискомфорт, вызываемый несогласованностью идей, ценностей, эмоциональных реакций, поступков индивида. В ситуации дилеммы заключённого, когнитивный диссонанс возникает между рациональной минимизации наказания и нравственным неприятием акта предательства; при этом, когнитивный диссонанс отсутствует в случае совпадения решений заключённых. Устранение когнитивного диссонанса является возможным психологическим мотивом нерациональной кооперации в дилемме заключённого.

обнаружения в случае проведения эксперимента. Как и в других подходах, это свойство обуславливает нелинейное сложение (интерференцию) вероятностей прихода в данное состояние по различным траекториям блуждания; оно же является причиной экспоненциально более быстрого движения системы в режиме квантового блуждания по сравнению с классическим режимом [175].

Примером использования модели случайного блуждания является задача о принятии решения на основе ограниченной, неопределённой либо противоречивой информации, в которой базисными состояниями когнитивной системы могут быть различные степени уверенности в принятии целевого решения. В модели [143] базисные состояния упорядочены по степени уверенности решения, так что изменение степени уверенности соответствует «блужданию» системы из одного состояния в другое. Временной интервал шага, алгоритм оценки уровня уверенности и условие принятия решения на каждом шаге являются параметрами модели.

В работе [176] разработан подход к описанию принятия решений в условиях стратегической неопределённости[1] на основе блуждания когнитивного состояния по сети доступных альтернатив. В ситуации стратегической неопределённости состояние когнитивной системы «блуждает» не только в пространстве собственных предпочтений, но и в пространстве состояний среды [177], как для случая трёх поведенческих альтернатив при двух возможных состояниях среды показано на Рис. 3.4. Соответствующая эволюция когнитивного процесса / состояния («когнитивное блуждание») проходит в шестимерном пространстве и описывается динамикой (3.15), дополненной диссипативными членами, описывающими взаимодействие когнитивного состояния с информационным окружением.

Подход к моделированию принятия решений, представленный в работе [176], является на настоящий момент одним из наиболее общих. Он позволяет моделировать ситуации принятия решений с произвольными уровнями неопределённости внешних условий («стратегичности»), произвольной способностью субъекта к различению выгодности возможных решений, а также произвольной степенью классичности-квантовости логики принятия решения.

[1] Стратегическая неопределённость имеет место при неопределённости внешних условий (иначе, контекста принятия решения), возможные состояния которых ведут к различным стратегиям принятия решения. В качестве таких внешних условий могут выступать, в частности, решения партнёров по ситуации принятия решения, как например в «дилемме заключённого».

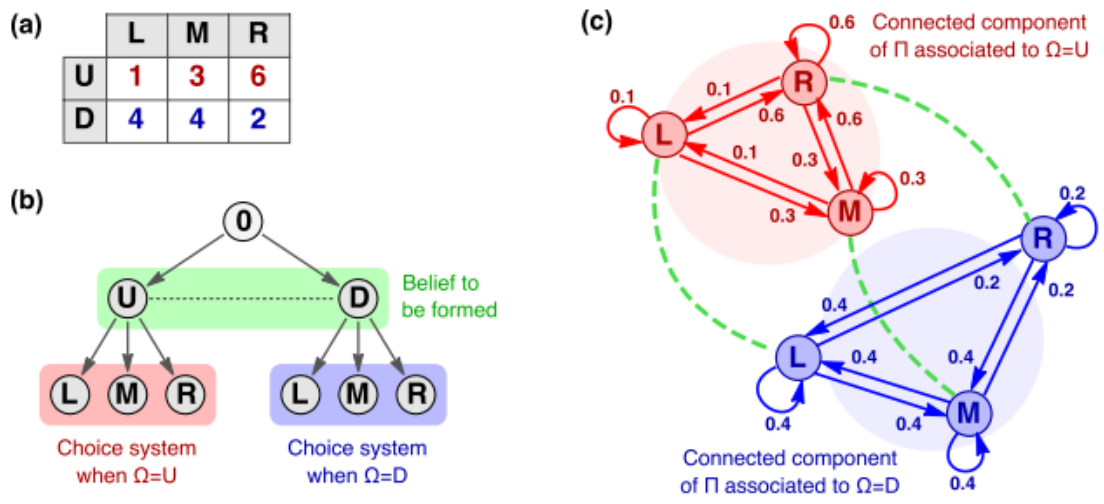

Рисунок 3.4 – Модель «случайного блуждания» когнитивного состояния субъекта, выбирающего одну из трёх альтернатив $\{L, M, R\}$ при двухвариантной неопределённости контекста $\{U, D\}$ [176]. (a): таблица полезности. (b): Дерево решений. (c): логическая сеть. Стрелками показаны возможные переходы между альтернативами при фиксированном состоянии среды, вероятности которых показаны числами; пунктиры соответствуют изменению представлений субъекта о состоянии среды

3.4.4 Принятие решений в непрерывном спектре возможностей

Применимость описанных ранее моделей поведения человека ограничена ситуациями принятия решения в дискретном спектре альтернатив [21, 38]. В этом разделе представлена модель принятия количественных решений, какими являются, например, многие экономические решения.

Рассмотрим ситуацию принятия решения в непрерывном спектр возможностей, характеризуемых действительной координатой x. Эта величина может иметь как смысл реальной координаты (например, положение регулятора температуры, громкости и т.д.), так и переносное значение (величина суммы денежных средств, количество приглашённых на общественное мероприятие и др.). Начальное состояние указателя x есть гауссов пакет с нулевым средним и шириной σ:

$$\phi(x) = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}} \exp\left[-\frac{x^2}{4\sigma^2}\right]. \tag{3.21}$$

Решение x принимается на основе состояния субъекта в когнитивном пространстве, определяемом набором из N базисных когнитивных состояний. Состояние совместной системы (когнитивная + указатель) есть

$$|\Psi\rangle = \sum_{i=1}^{N} c_i \, |A_i\rangle \otimes \phi(x), \tag{3.22}$$

где знак $\otimes$ означает произведение когнитивного пространства и пространства решений. Взаимодействию когнитивного состояния и состояния указателя в ходе принятия решения соответствует гамильтониан

$$\widehat{H} = g\hat{A} \otimes -i\frac{\partial}{\partial x}, \tag{3.23}$$

где $-i\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}$ есть канонический оператор импульса указателя, а g - константа взаимодействия. В соответствии с уравнением Шрёдингера (3.15) взаимодействие $\widehat{H}$ порождает эволюцию совместного состояния когнитивной системы и указателя с по закону

$$|\Psi(t)\rangle = \exp\left[-i\widehat{H}t\right]|\Psi\rangle \propto \sum_{i=1}^{N} c_i \exp\left[-\frac{(x - gt\lambda_i)^2}{4\sigma^2}\right] \otimes |A_i\rangle. \tag{3.24}$$

Таким образом, состояние указателя $\phi(x)$ разделяется на N пространственных пучков, соответствующих компонентам исходного когнитивного состояния субъекта; координата указателя – принятое решение – теперь коррелирует с когнитивным состоянием субъекта. Временна́я эволюция решения показана на Рис. 3.5.

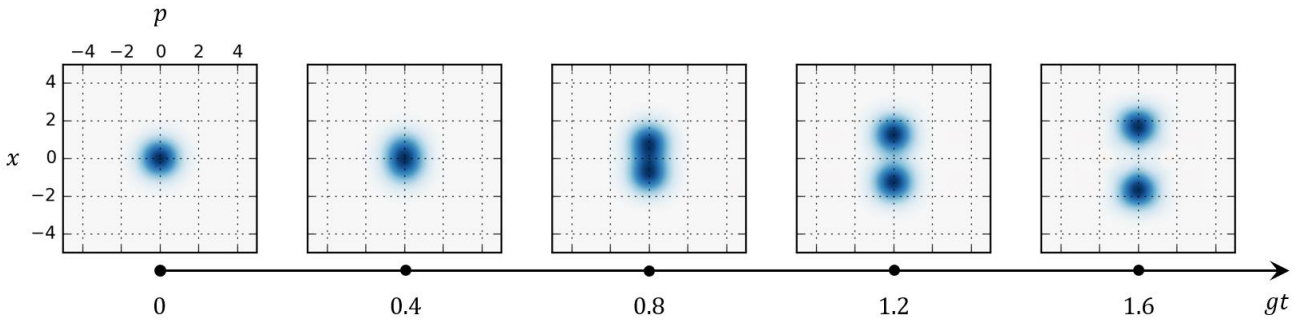

Рисунок 3.5 – Функция Вигнера системы указателя в последовательные моменты времени с шагом $g\Delta t = 0.4$. Координата указателя x соответствует решению в непрерывном спектре возможностей

Если время взаимодействия T достаточно велико для того, чтобы развести в пространстве гауссовы пучки, соответствующие компонентам i и j исходного когнитивного состояния субъекта, т.е.

$$gT\left(\lambda_i - \lambda_j\right) \gtrsim \sigma, \tag{3.25}$$

то принятие решения позволяет различить i-ю и j-ю компоненты суперпозиции, и ведёт к однозначному определению соответствующего когнитивного состояния.

Если предыдущее условие не выполняется, то принятие решения x переводит когнитивную систему в состояние

$$\langle x|\Psi(T)\rangle = \sum_{i=1}^{N} b_i\,|A_i\rangle, \qquad b_i = c_i\sqrt{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}}\exp\left[-\frac{(x-gT\lambda_i)^2}{4\sigma^2}\right], \tag{3.26}$$

которое отличается от исходного изменёнными весами компонент суперпозиции. Этими весами можно управлять, выбирая значения параметров g и T и регулируя тем самым степень «жёсткости», «уверенности» решения, выражаемую количественно как степень неопределённости когнитивного состояния после принятия решения.

Преобразование когнитивного состояния субъекта в результате принятия решения можно записать как

$$\langle x|\Psi(T)\rangle = \hat{E}(x,T)|\psi\rangle,$$

$$\hat{E}(x) = \mathrm{diag}\left\{\sqrt{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}}\exp\left[-\frac{(x-gT\lambda_i)^2}{4\sigma^2}\right]\right\}. \tag{3.27}$$

Множество операторов $\hat{E}(x,T)$ для всех значений x составляют набор положительно определённых операторных мер (POVM) эксперимента (разд. 3.5.3).

3.5 Бессознательные когнитивные процессы

3.5.1 Двухуровневая модель психики человека

Психика человека воспринимает и обрабатывает не менее 10 Мбит информации в секунду, тогда как быстродействие сознания составляет не более 40 бит в секунду[1] [178, гл. 6]. Подавляющая часть сенсорной информации обрабатывается без участия сознания – на *бессознательном уровне психики*, также как и сознание реализованном на нервно-физиологической системе организма [179, 180]. Бессознательные когнитивные процессы обуславливают работу сознания, однако в обычном состоянии психики недоступны для сознательного наблюдения [181, 182].

Свидетельствами описанного разграничения психики на сознательный и бессознательный уровни являются следующие наблюдения:

– большая часть когнитивных искажений (нарушений поведением когнитивной системы логики сознания) связана с проявлениями бессознательных когнитивных процессов. В частности показано, что когнитивные искажения усиливаются в ситуациях недостаточности сознательного

[1] С этим значением связана пороговая частота кадров, необходимая для создания иллюзии непрерывного движения в кинофильме.

быстродействия (сложность анализируемой ситуации, рассеянное внимание, временны́е ограничения, и т.д.), когда для решения задачи осуществляется прямое подключение бессознательной части когнитивной системы [181, 182];

– эксперименты показывают, что человек способен бессознательно порождать и прорабатывать несколько вариантов интерпретаций, гипотез *одновременно*; также возможно одновременное понимание нескольких значений многозначной информации (например, языковой), тогда как в каждый момент времени осознаётся единственное значение [183]. В данной картине бессознательной обработке информации можно сопоставить квантово-подобную многовариантность, а акту осознания – коллапс квантового состояния. Тогда, сознание представляет собой измерительный инструмент, взаимодействие с которым фиксирует результат работы параллельных «квантово-подобных» информационных процессов бессознательного.

В связи с этими и другими обстоятельствами в литературе имеет место рассмотрение сознательного и бессознательного уровней психики человека как носителей классических и квантовых свойств соответственно [80, 97, 184, 185].

Бессознательные процессы в когнитивистике играют роль, аналогичную «скрытым переменным» в квантовой физике [92, 118]: отсутствие прямого доступа к ним делает когнитивные системы «чёрными ящиками», демонстрирующими в экспериментах контекстуально-вероятностное поведение. В этом смысле квантовая теория представляет собой инструмент для вероятностного моделирования ансамблей таких «чёрных ящиков» [88, 117].

3.5.2 Рациональная полезность и фактор привлекательности

Бессознательные когнитивные процессы могут быть рассмотрены в явном виде [185]; можно ожидать, что их встраивание в стандартные квантово-подобные модели позволит повысить предсказательную силу последних. Некоторые ходы в данном направлении кратко представлены далее.

В стандартной квантово-подобной модели, вероятность принятия человеком решения x_i из когнитивного состояния, описываемого матрицей плотности $\hat{\rho}$ (разд. 2.2) даётся выражением

$$p(x_i) = \mathrm{Tr}\left[\hat{\rho}\hat{\Pi}(x_i)\right], \tag{3.28}$$

где $\hat{\Pi}(x_i)$ есть проектор на подпространство решения i в пространстве альтернатив ситуации выбора x.

Вероятность $p(x_i)$ можно разложить на компоненты

$$p(x_i) = f(x_i) + q(x_i), \tag{3.29}$$

где

$$f(x_i) = \sum_n \rho_{nn}\Pi_{nn}(x_i)\,, \qquad q(x_i) = \sum_{n\neq m} \rho_{nm}\Pi_{mn}(x_i), \tag{3.30}$$

$$\rho_{nm} = \langle n|\hat{\rho}|m\rangle, \qquad \Pi_{nm}(x_i) = \langle n\big|\widehat{\Pi}(x_i)\big|m\rangle.$$

Компонента $q(x_i)$ определяется величиной недиагональных элементов проектора и матрицы плотности, ответственных за интерференцию поведенческих альтернатив; в их отсутствие, $q(x_i) = 0$ и вероятность $p(x_i)$ сводится к классической компоненте $f(x_i)$, зависящей только от диагональных элементов проектора и матрицы плотности.

Компонента $f(x_i)$ названа *фактором полезности* и интерпретируется как сознательная вероятность выбора альтернативы x_i, в классической теории принятия (рациональных) решений выражаемая соотношением

$$f(x_i) = \frac{U(x_i)}{\sum_i U(x_i)}, \tag{3.31}$$

где $U(x_i)$ есть функция полезности, заданная на множестве альтернатив [186]. Из определения (3.31) следует, что величины $f(x_i)$ удовлетворяют ограничениям

$$0 \le f(x_i) \le 1, \qquad \sum_i f(x_i) = 1. \tag{3.32}$$

Компонента $q(x_i)$ названа *фактором привлекательности*; предполагается, что он выражает бессознательные, субъективные факторы принятия решений (эмоции, предрассудки, эвристики), не включённые человеком в осознаваемую функцию полезности $U(x_i)$, и таким образом не участвующие в формировании «рациональной» вероятности $f(x_i)$ [88]. Из определения следует, что величины $q(x_i)$ удовлетворяют ограничениям

$$-1 \le q(x_i) \le 1, \qquad \sum_i q(x_i) = 0. \tag{3.33}$$

Фактор полезности $q(x_i)$ можно представить как случайную величину, распределение φ которой определяется (неизвестным) состоянием психики субъекта; в отсутствие априорной информации о последнем, φ можно оценить как среднее между дельта-функцией $\varphi = \delta(0)$ и равномерным распределением $\varphi \equiv 1$ [88], что даёт среднее значение модуля фактора привлекательности

$$Q = \int_0^1 dq \left(\frac{\delta(0) + 1}{2}\right) * q = \frac{1}{4}. \tag{3.34}$$

Согласно данной оценке, при выборе одной из двух альтернатив, отклонения вероятности принятия решений от рационального ожидания в среднем составляют $1/4$.

Для предсказания знака фактора привлекательности могут быть привлечены эвристики – бессознательные когнитивные автоматизмы, используемые для практического разрешения поведенческих неопределённостей (разд. 13). Например, при выборе между двумя вариантами поведения A и B, задаваемыми наборами пар «выигрыш-вероятность»

$$\begin{aligned} A&: \ \{a_i, p(a_i)\}, \qquad i = 1,2,\ldots \\ B&: \ \{b_i, p(b_i)\}, \qquad i = 1,2,\ldots \end{aligned} \tag{3.35}$$

предлагается использовать параметр

$$\alpha = \frac{a_{\max}}{b_{\max}} * \frac{p_B(b_{\min})}{p_A(a_{\min})} - 1 \tag{3.36}$$

и эвристику

$$\operatorname{sign} q(A) = \begin{cases} +1, & \alpha(A) > 0 \\ -1, & \alpha(A) \leq 0 \end{cases}, \tag{3.37}$$

взвешивающую отношения выигрышей и рисков.

Данный подход может быть использован для предсказательного моделирования вероятностей принятия решений [187, 188].

3.5.3 Аппарат ментальных инструментов и POVM

Преобразование когнитивного состояния человека при совершении выбора свидетельствует о том, что процесс принятия решений реализуется на более широком пространстве возможностей, чем пространство альтернатив совершаемого выбора. Вследствие этого моделирование процесса принятия решений помимо «пространства решений» требует вовлечения более широкого «пространства мышления», которое в общем случае недоступно для сознательного контроля [189]. Такой режим принятия решений, названный «безсознательным измерением», может быть смоделирован с помощью привлечения аппарата положительно-определённых операторных мер квантовой теории [98, с. 90–93, 190, 191].

Согласно базовой квантовой теории (разд. 2) возможные исходы эксперимента являются взаимоисключающими. В результате эксперимента, квантовое состояние системы переходит в одно из таких состояний и в отсутствие внешних возмущений остаётся в нём, так что повторение того же эксперимента с определённостью даёт тот же результат. Для моделирования процесса принятия решений эти ограничения оказываются излишне жёсткими: во многих ситуациях, исходы когнитивных измерений не являются ни взаимоисключающими, ни ортогональными [60, 192].

Как отмечалось ранее, внутреннее состояние как квантово-физических, так и когнитивно-поведенческих систем недоступно для прямого наблюдения; получить доступ к ним можно лишь опосредованно с помощью

экспериментального вмешательства, когда внутреннее состояние системы приводится во взаимодействие с непосредственно наблюдаемой поведенческой степенью свободы - системой-указателем [192]. Система-указатель соответствует решению, принимаемому на основе когнитивного состояния субъекта, которое в общем случае может не осознаваться субъектом. Такой механизм (частично) бессознательного принятия решений позволяет объяснить неповторяемость последовательных одинаковых решений, а также отличное от стандартного преобразование осознаваемой части когнитивного состояния субъекта в результате принятия решения.

Моделирование (частично) бессознательных решений возможно с помощью аппарата положительно-определённых операторных мер (POVM), заимствованного из квантовой теории измерений [98]. В аппарате POVM, эксперименту (ситуации принятия решения) сопоставляется набор положительно-определённых эрмитовых операторов $\hat{E}_i$, в сумме составляющих единицу:

$$\sum_i \hat{E}_i = \hat{1}. \tag{3.38}$$

Вероятность реализации i-го исхода эксперимента определяется аналогично стандартной модели:

$$p_i = \langle\psi|\hat{E}_i|\psi\rangle, \tag{3.39}$$

где $|\psi\rangle$ есть квантовое состояние системы.

В отличие от проекторов на собственные подпространства некоторой наблюдаемой $\hat{\Pi}_i = |A_i\rangle\langle A_i|$, операторы $\hat{E}_i$ не обязательно ортогональны и идемпотентны:

$$\hat{E}_i\hat{E}_j \neq \delta_{ij}, \quad \hat{E}_i^2 \neq \hat{E}_i. \tag{3.40}$$

Неортогональность и неидемпотентность элементов POVM соответствует тому, что альтернативные исходы экспериментов не являются взаимоисключающими: вероятность последовательного принятия различных решений i и j есть $p_{ij} = \langle\psi|\hat{E}_i\hat{E}_j|\psi\rangle \neq 0$, а вероятность двукратного повторения одного и того же решения не равна вероятности однократного решения: $p_{ii} \neq p_i$. Таким образом, аппарат POVM описывает принятие «нечётких» решений, в результате которых когнитивная система оказывается не в одном из собственных состояний ситуации принятия решения, но в некоторой их смешанной комбинации, зависящей от исходного когнитивного состояния, исходного состояния системы-указателя в пространстве решений и взаимодействия между ними в ходе принятия решения; супер-оператор, описывающий преобразование когнитивного состояния в результате принятия частично-бессознательного решения, предложено называть *ментальным инструментом* [189, 190].

Примером применения аппарата POVM является модель решений человека в непрерывном спектре возможностей, приведённая в разд. 3.4.4.

3.6 Задания для самопроверки и дополнительной работы

1. Дайте определения следующим понятиям:
   а. Психика
   б. Сознательный, бессознательный уровни психики

2. Привести примеры ситуаций, когда вмешательство бессознательных когнитивных процессов приводит к нарушению рациональности решений человека. Для каждого случая указать нарушаемое положение классической булевой логики.

3. Соотнести поведенческий принцип определённости (Sure thing principle, разд. 3.2.4) и принцип неопределённости в квантовой теории.

4. На основе разд. 3.3.2 построить квантовую модель корреляции эффектов порядка (разд. 3.2.2.2).

5. Построить квантовую модель экспериментов, описанных в разд. 3.3.4 и определить фазу интерферирующих поведенческих альтернатив.

6. Применить модель разд. 3.5.2 для моделирования решений в реальной поведенческой ситуации. Определить точность предсказания модели.

7. Соотнести содержание разд. 3.3.4 с технологией управления общественным мнением «Окна Овертона». Найти примеры в собственном опыте, соотнести реальную эффективность и быстродействие с предсказанием модели.

Дополнительные материалы:
[6, 97, 150, 158, 162–164, 180, 185, 187, 190, 193–198].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение последних 25 лет, квантовая теория успешно применяются для описания когнитивно-поведенческих процессов в живых системах, включая восприятие, мышление, принятие решений, язык человека. Эта совместимость естественнонаучной теории и традиционно гуманитарных наук является, по всей видимости, неслучайной: многочисленные «квантовые» аналогии в психологии, биологии, лингвистике, социологии, искусственном интеллекте, и даже в алгоритмах обработки данных, позволяют предположить, что эти сходства обусловлены фундаментальными законами протекания многовариантных процессов, общими для разных уровней организации природы.

Современная наука проходит этап смены основополагающих парадигм. До недавнего времени единственной такой парадигмой являлась методология классического естествознания, которая явно или по умолчанию сформировала многие частные науки в сегодняшнем их состоянии. Не умаляя значения достигнутых с её помощью результатов, классическая парадигма в науках о человеке и обществе оказывается неэффективной в решении многих современных задач; имеет место фрагментарность и рассогласованность имеющихся психологических, социологических, экономических, экологических, естественнонаучных моделей. В эпоху антропоцен, когда облик планеты во многом определяется деятельностью человека, такое состояние науки представляет критическую опасность для существования общества.

Единственным подходом к преодолению сложившегося междисциплинарного кризиса представляется согласование естественных и гуманитарных наук на общей методологической основе. Описанный в настоящем пособии математический аппарат квантовой теории и методология его применения к описанию элементарных закономерностей поведения человека являются отправной точкой в этом процессе.

ИСТОЧНИКИ

1. Величковский Б.М. Современная когнитивная психология. Москва: Издательство Московского Университета, 1982. 336 с.
2. Watson J.B. Psychology as the Behaviorist Views it // Psychol. Rev. 1913. Т. 20. С. 158–177.
3. Fechner G.T. Elemente der Psychophysik. 1860.
4. James W. The Principles of Psychology. New York: Henry Holt and Co., 1890.
5. Bohr N. Collected Works Volume 10: Complementarity beyond physics / под ред. Aaserud F. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1999. 613 с.
6. Atmanspacher H. The hidden side of Wolfgang Pauli: An Eminent Physicist's Extraordinary Encounter with Depth Psychology // J. Conscious. Stud. 1996. Т. 3, № 2. С. 112–126.
7. Peres A. Quantum Theory: Concepts and Methods. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. 464 с.
8. Wendt A. Quantum Mind and Social Science. Cambridge University Press, 2015. 354 с.
9. Riel R., Gulick R. Scientific Reduction // The Stanford Encyclopedia of Philosophy https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/scientific-reduction/. 2016.
10. Healey R. Holism and nonseparability in physics // Stanford Encyclopedia of Philosophy https://plato.stanford.edu/archives/spr2016/entries/physics-holism/. 2016.
11. Гуревич И.И., Фейгенберг И.М. Какие вероятности работают в психологии? // Вероятностное прогнозирование деятельности человека. Москва: Наука, 1977. С. 9–21.
12. Аллахвердов В.М. Методологическое путешествие по океану бессознательного к таинственному острову сознания. Санкт-Петербург: Речь, 2003.
13. Young G. Unifying Causality and Psychology. Cham: Springer, 2016. 950 с.
14. Stapp H.P. Quantum Theory and Free Will. Springer, 2017. 142 с.
15. Friedman M., Savage L.J. The Utility Analysis of Choices Involving Risk // J. Polit. Econ. 1948. Т. 56, № 4. С. 279–304.
16. фон Нейман Д., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. Москва: Наука, 1970. 707 с.
17. Льюис Р.Д., Райфа Х. Игры и решения: Введение и критический обзор. Пер. с анг / под ред. Юдин Д.Б. Москва: Издательство иностранной литературы, 1961. 642 с.
18. Kahneman B.Y.D., Tversky A. Prospect Theory. An analysis of decision under risk // Econometrica. 1979. Т. 47, № 2. С. 263–291.
19. Hansson B. The appropriateness of the expected utility model // Erkenntnis. 1975. Т. 9, № 2. С. 175–194.
20. Erev I. и др. From anomalies to forecasts: Toward a descriptive model of decisions under risk, under ambiguity, and from experience. // Psychol. Rev.

2017. Т. 124, № 4. С. 369–409.
21. Busemeyer J.R., Bruza P.D. Quantum Models of Cognition and Decision. Cambridge University Press, 2012. 426 с.
22. Feldman J.M., Lynch J.G. Self-generated validity and other effects of measurement on belief, attitude, intention, and behavior. // J. Appl. Psychol. 1988. Т. 73, № 3. С. 421–435.
23. Schwarz N. Attitude Construction: Evaluation in Context // Soc. Cogn. 2007. Т. 25, № 5. С. 638–656.
24. Kim B. The locality and globality of instrumental rationality: the normative significance of preference reversals // Synthese. 2014. Т. 191, № 18. С. 4353–4376.
25. Bohm D.J., Hiley B.J. On the intuitive understanding of nonlocality as implied by quantum theory // Found. Phys. 1975. Т. 5, № 1. С. 93–109.
26. Бом Д. Развёртывающееся значение. Владивосток: Издательство Дальневосточного государственного технического университета, 1992. 211 с.
27. Khrennikov A. Quantum-like brain: Interference of minds // BioSystems. 2006. Т. 84, № 3. С. 225–241.
28. Kitto K. High end complexity // Int. J. Gen. Syst. 2008. Т. 37, № 6. С. 689–714.
29. Латыпов Р.А. О моделировании динамики состояний концептов как квантовых сущностей // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2015. Т. 5, № 47. С. 97–102.
30. Фоломешкина С.В. Параллели развития научной парадигмы и психоаналитических теорий. МААП, 2010.
31. Weizsäcker E.U., Wijkman A. Come On! Capitalism, Short-termism, Population and the Destruction of the Planet. New York: Springer New York, 2018. 232 с.
32. Bouchaud J.P. Economics needs a scientific revolution // Nature. 2008. Т. 455, № 7217. С. 1181.
33. Krugman P. How Did Economists Get It So Wrong? // The New York Times. New York, 2009. С. MM36.
34. Bohr N. Light and Life // Nature. 1933. Т. 131, № 3308. С. 421–423.
35. Aerts D. Quantum structures: An attempt to explain the origin of their appearance in nature // Int. J. Theor. Phys. 1995. Т. 34, № 8. С. 1165–1186.
36. Aerts D., Czachor M., Durt T. Probing the Structure of Quantum Mechanics // Probing the Structure of Quantum Mechanics: Nonlinearity, Nonlocality, Computation, Axiomatics. Singapore: World Scientific, 2002.
37. Atmanspacher H., Römer H., Walach H. Weak Quantum Theory: Complementarity and Entanglement in Physics and Beyond // Found. Phys. 2002. Т. 32, № 3. С. 379–406.
38. Khrennikov A. Ubiquitous quantum structure: From psychology to finance. Springer Science & Business Media, 2010. 216 с.
39. Gabora L. A Cross-disciplinary Framework for the Description of Contextually Mediated Change // Electron. J. Theor. Phys. 2007. Т. 4, № 15.

С. 1–22.
40. Khrennikov A. Contextual Approach to Quantum Formalism. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. 354 с.
41. де Ла Барьер П. Курс теории автоматического управления. Москва: Машиностроение, 1973. 396 с.
42. Yukalov V.I., Sornette D. Self-organization in complex systems as decision making // Adv. Complex Syst. 2014. Т. 17, № 03n04. С. 1450016.
43. Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. М.: Мир, 1968. 382 с.
44. Bradley R.T., Pribram K.H. Communnication and Stability in Social Collectives // J. Soc. Evol. Syst. 1998. Т. 21, № 1. С. 29–81.
45. Кравченко А.В. Что такое “когнитивная структура”, или об одном распространенном заблуждении // Взаимодействие когнитивных и языковых структур. Москва: Известия РАН, ТГУ им. Г.Р.Державина, 2011. С. 96–104.
46. Кравченко А.В. Классификация знаков и проблема заимосвязи языка и знания // Вопросы языкознания. 1999. № 6.
47. Gabora L., Rosch E., Aerts D. Toward an ecological theory of concepts // Ecol. Psychol. 2008. Т. 20, № 1. С. 84–116.
48. Buchanan M. Quantum minds // New Sci. Reed Business Information Ltd, England, 2011. Т. 211, № 2828. С. 34–37.
49. Bradley R.T. Dialogue, information, and psychosocial organization // The Transformative Power of Dialogue. 2002. Т. 24. С. 243–288.
50. Bohm D. On Dialogue. London: Routledge, 1996. 101 с.
51. Asano M. и др. Quantum Adaptivity in Biology: From Genetics to Cognition. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. 173 с.
52. Igamberdiev A.U., Shklovskiy-Kordi N.E. The quantum basis of spatiotemporality in perception and consciousness // Prog. Biophys. Mol. Biol. Elsevier Ltd, 2017. Т. 130. С. 15–25.
53. Kolchinsky A., Wolpert D.H. Semantic information, autonomous agency and non-equilibrium statistical physics // Interface Focus. 2018. Т. 8, № 6. С. 20180041.
54. Davies P.C.W. Does quantum mechanics play a non-trivial role in life? // BioSystems. 2004. Т. 78, № 1–3. С. 69–79.
55. Melkikh A. V. Biological complexity, quantum coherent states and the problem of efficient transmission of information inside a cell // BioSystems. Elsevier Ireland Ltd, 2013. Т. 111, № 3. С. 190–198.
56. Asano M. и др. Quantum Information Biology: From Information Interpretation of Quantum Mechanics to Applications in Molecular Biology and Cognitive Psychology // Found. Phys. Springer US, 2015. Т. 45, № 10. С. 1362–1378.
57. Driessen A. Life and quantum biology, an interdisciplinary approach // Acta Philos. 2015. Т. 24, № 1. С. 69–86.
58. Maldonado C.E., Gómez-Cruz N.A. Synchronicity among biological and computational levels of an organism: Quantum biology and complexity //

Procedia Comput. Sci. Elsevier Masson SAS, 2014. Т. 36, № С. С. 177–184.
59. Tarlacı S., Pregnolato M. Quantum neurophysics: From non-living matter to quantum neurobiology and psychopathology // Int. J. Psychophysiol. 2016. Т. 103. С. 161–173.
60. Khrennikov A. и др. Quantum Models for Psychological Measurements: An Unsolved Problem // PLoS One / под ред. Lu Z.-L. 2014. Т. 9, № 10. С. e110909.
61. Khrennikov A. Quantum-like modeling of cognition // Front. Phys. 2015. Т. 3, № 77.
62. Bohm D., Hiley B.., Kaloyerou P.. An ontological basis for the quantum theory // Phys. Rep. 1987. Т. 144, № 6. С. 321–375.
63. Wallace W.A., Sondheimer N.K., Will P.M. The Collective Mind Initiative Report. DARPA, 2007. С. 21.
64. Detrain C., Deneubourg J.L. Self-organized structures in a superorganism: do ants «behave» like molecules? // Phys. Life Rev. 2006. Т. 3, № 3. С. 162–187.
65. Ben-Jacob E., Levine H. Self-engineering capabilities of bacteria // J. R. Soc. Interface. 2006. Т. 3, № 6. С. 197–214.
66. Capra F. The Web of Life: A New Scientific Understanding of Living Systems. New York: Anchor Books, 1996. 348 с.
67. Baladrón C., Khrennikov A. Outline of a unified Darwinian evolutionary theory for physical and biological systems // Prog. Biophys. Mol. Biol. 2017. Т. 130. С. 80–87.
68. Whitehead A.N. Process and reality. New York: Macmillan, 1929. 413 с.
69. Capra F., Luisi L. The Systems View of Life: A Unifying Vision. Cambridge University Press, 2014. 510 с.
70. Meijer D. Information: what do you mean // Syntropy J. 2013. № 3. С. 1–49.
71. Hilbert M. How to measure «how much information»? Theoretical, methodological, and statistical challenges for the social sciences // Int. J. Commun. 2012. Т. 6, № 1. С. 1042–1055.
72. Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации. Москва, 2013. С. 77.
73. Khrennikov A. On quantum-like probabilistic structure of mental information // Open Syst. Inf. Dyn. 2004. Т. 11, № 3. С. 267–275.
74. Floridi L. Informational Realism // Conferences in Research and Practice in Information Technology. 2004. Т. 37. С. 7–12.
75. Wheeler J.A. World as system self-synthesized by quantum networking // IBM J. Res. Dev. 1988. Т. 32, № 1. С. 4–15.
76. Gabora L., Kitto K. Toward a Quantum Theory of Humor // Front. Phys. 2017. Т. 4, № January. С. 1–10.
77. Belkin N.J. The cognitive viewpoint in information science // J. Inf. Sci. 1990. Т. 16, № 1. С. 11–15.
78. Beavers A.F. A Brief Introduction to the Philosophy of Information. 2011. № 2011. С. 1–11.
79. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. Москва: Наука, 2001. 105 с.

80. Khrennikov A. Classical and quantum mechanics on information spaces with applications to cognitive, psychological, social, and anomalous phenomena // Found. Phys. 1999. Т. 29, № 7. С. 1065–1098.
81. Aerts D. и др. Towards a quantum World Wide Web // Theor. Comput. Sci. Elsevier B.V., 2018. Т. 1. С. 1–16.
82. Wheeler J.A. Information, Physics, Quantum: The Search for Links // 3rd Int. Symp. Found. Quantum Mech. 1989. С. 3–28.
83. Bohm D. A new theory of the relationship of mind and matter // Philos. Psychol. 1990. Т. 3, № 2–3. С. 271–286.
84. Dalla Chiara M.L. и др. Quantum information, cognition, and music // Front. Psychol. 2015. Т. 6, № ОСТ.
85. Orlov Y.F. A quantum model of doubt // Ann. N. Y. Acad. Sci. 1981. Т. 373. С. 84–92.
86. Orlov Y.F. The wave logic of consciousness: A hypothesis // Int. J. Theor. Phys. 1982. Т. 21, № 1. С. 37–53.
87. Haven E., Khrennikov A. Quantum Social Science. New York: Cambridge University Press, 2013.
88. Yukalov V.I., Sornette D. Decision theory with prospect interference and entanglement // Theory Decis. 2011. Т. 70, № 3. С. 283–328.
89. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей. Москва: Наука, 1974. 120 с.
90. Boole G. An Investigation of the Laws of Thought on Which are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities. London: Walton and Maberly, 1854.
91. Bell J.S. Against «measurement» // Physics World. 1990. Т. 3. С. 32–41.
92. Khrennikov A. After Bell // Fortschritte der Phys. 2017. Т. 65, № 6–8. С. 1600044.
93. Александров А.Д. О смысле волновой функции // Доклады Академии Наук СССР. 1952. Т. 85, № 2. С. 291–294.
94. Zurek W.H. Decoherence and the Transition from Quantum to Classical—Revisited // Los Alamos Sci. 2002. № 27. С. 25.
95. Zurek W.H. Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical // Rev. Mod. Phys. 2003. Т. 75, № 3. С. 715–775.
96. Terhal B.M., Horodecki P. Schmidt number for density matrices // Phys. Rev. A. 2000. Т. 61, № 4. С. 040301.
97. Khrennikov A. Classical and quantum dynamics on p-adic trees of ideas // BioSystems. 2000. Т. 56, № 2–3. С. 95–120.
98. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information // Cambridge University Press. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 702 с.
99. Grib A.A., Rodrigues W.A. Nonlocality in Quantum Physics. Boston, MA: Springer US, 1999.
100. Birkhoff G., Neumann J. Von. The Logic of Quantum Mechanics // Ann. Math. 1936. Т. 37, № 4. С. 823–842.
101. Suppes P. Probability Concepts in Quantum Mechanics // Philos. Sci. 1961. Т.

28, № 4. С. 378–389.
102. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Том 8. Москва: М.: Мир, 1966. 267 с.
103. Tourangeau R., Rips L.J., Rasinski K.A. The Psychology of Survey Response. Cambridge University Press, 2000. 401 с.
104. Schumann H., Presser S. Questions and answers in attitude surveys: Experiments on question form, wording, and content. New York: Academic Press, 1981. 372 с.
105. Sudman S., Bradburn N. Response Effects in Surveys. Chicago: Aldine Publishing, 1974. 258 с.
106. Hippler H.-J., Schwarz N. Response Effects in Surveys // Social Information Processing and Survey Methodology. New York: Springer, 1987. С. 102–122.
107. Kahneman D., Slovic P., Tversky A. Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases. Cambridge University Press, 1982. 555 с.
108. Kahneman D. Thinking, Fast and Slow. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2011. 499 с.
109. Grib A. Quantum Logic and Macroscopic Quantum Games // AIP Conference Proceedings. AIP, 2007. Т. 962. С. 91–97.
110. Aerts D. A mechanistic classical laboratory situation violating the Bell inequalities with 2√2, exactly «in the same way» as its violations by the EPR experiments . // Helv. Phys. Acta. 1991. Т. 64. С. 1–22.
111. Grib A. и др. Quantum equilibria for macroscopic systems // J. Phys. A. Math. Gen. 2006. Т. 39, № 26. С. 8461–8475.
112. Aerts D. The Stuff the World is Made of: Physics and Reality // Einstein Meets Magritte: An Interdisciplinary Reflection. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. С. 129–183.
113. Aerts D. Quantum structure in cognition // J. Math. Psychol. Elsevier Inc., 2009. Т. 53, № 5. С. 314–348.
114. Caves C.M., Fuchs C.A., Schack R. Subjective probability and quantum certainty // Stud. Hist. Philos. Sci. Part B - Stud. Hist. Philos. Mod. Phys. 2007. Т. 38, № 2. С. 255–274.
115. Gorder P.F. You’re not irrational, you’re just quantum probabilistic: Researchers explain human decision-making with physics theory // Phys.org. 2015. № September. С. 1–3.
116. Auffeves A., Grangier P. Contexts, Systems and Modalities: A New Ontology for Quantum Mechanics // Found. Phys. Springer US, 2016. Т. 46, № 2. С. 121–137.
117. Khrennikov A. Vaxjo interpretation of wave function: 2012 // AIP Conf. Proc. 2012. Т. 1508. С. 244–252.
118. Bell J.S. Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. Cambridge University Press, 1993.
119. Cervantes V.H., Dzhafarov E.N. Snow queen is evil and beautiful: Experimental evidence for probabilistic contextuality in human choices. // Decision. 2018. Т. 5, № 3. С. 193–204.
120. Aerts D. и др. Spin and Wind Directions I: Identifying Entanglement in Nature

and Cognition // Found. Sci. 2017.
121. Aerts D. и др. Spin and Wind Directions II: A Bell State Quantum Model // Found. Sci. 2017.
122. Aerts D. и др. The Violation of Bell Inequalities in the Macroworld // Found. Phys. 2000. Т. 30, № 9. С. 1387–1414.
123. Aerts D. Quantum and concept combination, entangled measurements, and prototype theory // Top. Cogn. Sci. 2014. Т. 6, № 1. С. 129–137.
124. Warmuth M.K., Kuzmin D. Bayesian generalized probability calculus for density matrices // Mach. Learn. 2010. Т. 78, № 1–2. С. 63–101.
125. Kupczyński M. Bertrand's paradox and Bell's inequalities // Phys. Lett. A. 1987. Т. 121, № 5. С. 205–207.
126. Bruza P.D., Cole R.J. Quantum Logic of Semantic Space: An Exploratory Investigation of Context Effects in Practical Reasoning // We Will Show Them: Essays in Honour of Dov Gabbay / под ред. Artemov S. и др. London: College Publications, 2005. С. 339–361.
127. Пенроуз Р. Тени разума. В поисках науки о сознании. Часть II: Новая физика, необходимая для понимания разума. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 352 с.
128. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. Москва: УРСС, 2003. 999 с.
129. Гнидко К.О. Моделирование индивидуального и группового поведения в p-адических системах координат для решения задач информационной безопасности // Труды СПИИРАН. 2016. Т. 1, № 44. С. 65–82.
130. Теорема Гёделя о неполноте [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Гёделя_о_неполноте (дата обращения: 20.08.2009).
131. Lloyd S. Theorem of Human Unpredictability [Электронный ресурс]. 2014. URL: http://serious-science.org/theorem-of-human-unpredictability-248.
132. Fischhoff B., Beyth-Marom R. Hypothesis evaluation from a Bayesian perspective // Psychol. Rev. 1983. Т. 90, № 3. С. 239–260.
133. Kahneman D., Tversky A. Choices, values, and frames // Am. Psychol. 1984. Т. 39, № 4. С. 341.
134. Tversky A., Kahneman D. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases // Science (80-.). 1974. Т. 185, № 4157. С. 1124–1131.
135. Александров А.А. Интегративная психология. Санкт-Петербург: Питер, 2009. 352 с.
136. Busemeyer J.R., Wang Z. What Is Quantum Cognition, and How Is It Applied to Psychology? // Curr. Dir. Psychol. Sci. 2015. Т. 24, № 3. С. 163–169.
137. Васин А.А., Морозов В.В. Теория игр и модели математической экономики. Москва: Макс-пресс, 2005. 278 с.
138. Shafir E., Tversky A. Thinking through uncertainty: Nonconsequential reasoning and choice // Cogn. Psychol. 1992. Т. 24, № 4. С. 449–474.
139. Croson R.T.A. The Disjunction Effect and Reason-Based Choice in Games // Organ. Behav. Hum. Decis. Process. 1999. Т. 80, № 2. С. 118–133.
140. Busemeyer J.R., Matthews M., Wang Z. A quantum information processing

explanation of disjunction effects. // 28th Annu. Conf. Cogn. Sci. Soc. 5th Int. Conf. Cogn. Sci. 2006. № 1999. С. 131–135.
141. Li S., Taplin J. Examining whether there is a disjunction effect in prisoner's dilemma games // Chinese J. Psychol. 2002. Т. 44, № 1. С. 25–46.
142. Pothos E.M., Busemeyer J.R. A quantum probability explanation for violations of «rational» decision theory // Proc. R. Soc. B Biol. Sci. 2009. Т. 276, № 1665. С. 2171–2178.
143. Busemeyer J.R., Wang Z., Townsend J.T. Quantum dynamics of human decision-making // J. Math. Psychol. 2006. Т. 50, № 3. С. 220–241.
144. Moore D.W. Measuring new types of question-order effects // Public Opin. Q. 2002. Т. 66. С. 80–91.
145. Wang Z. и др. Context effects produced by question orders reveal quantum nature of human judgments. Supplementary Information // Proc. Natl. Acad. Sci. 2014. Т. 111, № 26.
146. Wang Z., Busemeyer J.R. A quantum question order model supported by empirical tests of an a priori and precise prediction // Top. Cogn. Sci. 2013. Т. 5, № 4. С. 689–710.
147. Wang Z. и др. Context effects produced by question orders reveal quantum nature of human judgments // Proc. Natl. Acad. Sci. 2014. Т. 111, № 26.
148. Eisenberg M.B. Order effects: A study of the possible influence of presentation order on user judgment of document relevance // J. Am. Soc. Inf. Sci. 1988. Т. 39, № 5. С. 293–300.
149. Tversky A., Kahneman D. Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment. // Psychol. Rev. 1983. Т. 90, № 4. С. 293–315.
150. Chase R.H.V.M. Many Reasons or Just One: How Response Mode Affects Reasoning in the Conjunction Problem // Think. Reason. 1998. Т. 4, № 4. С. 319–352.
151. Savage L.J. The foundations of statistics. New York: John Wiley & Sons Inc., 1954.
152. Tversky A., Shafir E. The Disjunction Effect in Choice Under Uncertainty // Psychol. Sci. 1992. Т. 3, № 5. С. 305–309.
153. Lambdin C., Burdsal C. The disjunction effect reexamined: Relevant methodological issues and the fallacy of unspecified percentage comparisons // Organ. Behav. Hum. Decis. Process. 2007. Т. 103, № 2. С. 268–276.
154. Kühberger A., Komunska D., Perner J. The Disjunction Effect: Does It Exist for Two-Step Gambles? // Organ. Behav. Hum. Decis. Process. 2001. Т. 85, № 2. С. 250–264.
155. Busemeyer J.R. и др. A quantum theoretical explanation for probability judgment errors // Psychol. Rev. 2011. Т. 118, № 2. С. 193–218.
156. Barkan R., Busemeyer J.R. Modeling Dynamic Inconsistency with a Changing Reference Point // J. Behav. Decis. Mak. 2003. Т. 16, № 4. С. 235–255.
157. Busemeyer J.R., Wang J., Shiffrin R. Bayesian model comparison of quantum versus traditional models of decision making for explaining violations of the dynamic consistency principle // Found. Appl. Util. Risk Decis. Theory. 2012.

№ 1963. С. 1–15.
158. Busemeyer J.R., Wang Z., Lambert-Mogiliansky A. Empirical comparison of Markov and quantum models of decision making // J. Math. Psychol. Elsevier Inc., 2009. Т. 53, № 5. С. 423–433.
159. Khrennikov A.Y., Haven E. Quantum mechanics and violations of the sure-thing principle: The use of probability interference and other concepts // J. Math. Psychol. Elsevier Inc., 2009. Т. 53, № 5. С. 378–388.
160. Hogarth R.M., Einhorn H.J. Order effects in belief updating: The belief-adjustment model // Cogn. Psychol. 1992. Т. 24, № 1. С. 1–55.
161. Trueblood J.S., Busemeyer J.R. A quantum probability account of order effects in inference // Cogn. Sci. 2011. Т. 35, № 8. С. 1518–1552.
162. Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Окна Овертона в развитии современной концепции биосферы и решении глобальных экологических проблем // Биосфера. 2015. Т. 7, № 4. С. 429–449.
163. Алкснис И. Игры Запада со смертью: вывернет ли окно Овертона из «рамы» [Электронный ресурс]. URL: https://ria.ru/analytics/20180427/1519486309.html.
164. Окна Овертона. Технология уничтожения общества [Электронный ресурс]. 2015. URL: http://somatra.ru/okna-overtona/okno-overtonap-tehnologiya-smerti.html.
165. Gabora L., Aerts D. Evolution as context-driven actualisation of potential: toward an interdisciplinary theory of change of state // Interdiscip. Sci. Rev. 2005. Т. 30, № 1. С. 69–88.
166. Misra B., Sudarshan E.C.G. The Zeno’s paradox in quantum theory // J. Math. Phys. 1977. Т. 18, № 4. С. 756–763.
167. Itano W.M. и др. Quantum Zeno effect // Phys. Rev. A. 1990. Т. 41, № 5. С. 2295–2300.
168. Pool R. Quanturn Pot Watching // Science (80-.). 1989. Т. 246. С. 888.
169. Yearsley J.M., Pothos E.M. Zeno’s paradox in decision-making // Proc. R. Soc. B Biol. Sci. 2016. Т. 283, № 1828. С. 20160291.
170. Bagarello F. A Quantum-Like View to a Generalized Two Players Game // Int. J. Theor. Phys. 2015. Т. 54, № 10. С. 3612–3627.
171. Marinatto L., Weber T. A quantum approach to static games of complete information // Phys. Lett. A. 2000. Т. 272. С. 291–303.
172. Gisin N. Bell’s inequality holds for all non-product states // Phys. Lett. A. 1991. Т. 154, № 5–6. С. 201–202.
173. Festinger L. A Theory of Cognitive Dissonance. Stanford University Press, 1962. 291 с.
174. Bagarello F. и др. (H, ρ)-induced dynamics and the quantum game of life // Appl. Math. Model. 2017. Т. 43. С. 15–32.
175. Childs A.M., Farhi E., Gutmann S. An Example of the Difference Between Quantum and Classical Random Walks // Quantum Inf. Process. 2002. Т. 1, № 1/2. С. 35–43.
176. Martínez-Martínez I., Sánchez-Burillo E. Quantum stochastic walks on networks for decision-making // Sci. Rep. Nature Publishing Group, 2016. Т.

6, № July 2015. С. 23812.
177. Asano M., Ohya M., Khrennikov A. Quantum-Like Model for Decision Making Process in Two Players Game // Found. Phys. 2011. Т. 41, № 3. С. 538–548.
178. Норретрандерс Т. The User Illusion: Cutting Consciousness Down to Size. Penguin Books Ltd., 1999. 480 с.
179. Robson D. Your clever body // New Sci. Reed Business Information Ltd, England, 2011. Т. 212, № 2834. С. 34–38.
180. Westen D. The Scientific Status of Unconscious Processes: Is Freud Really Dead? // J. Am. Psychoanal. Assoc. 1999. Т. 47, № 4. С. 1061–1106.
181. Агафонов А.Ю. Когнитивная психомеханика сознания, или как сознание неосознанно принимает решение об осознании. 2–е издани изд. Самара, 2007.
182. Агафонов А.Ю. По обе стороны сознания / под ред. Агафонов А.Ю. Самара: Издательский дом «Бахрах-М», 2012. 192 с.
183. Куделькина Н.С. Восприятие многозначной информации как предмет психологического исследования // Вестник Санкт-Петербургского Университета. 2008. Т. 12, № 4. С. 268–276.
184. Данилевский И.В. О новом варианте онтологии бессознательного // Вестник Пермского Университета. 2013. Т. 1, № 13. С. 27–38.
185. Хренников А.Ю. Моделирование процессов мышления в p-адических системах координат. Москва: Физматлит, 2004. 296 с.
186. Favre M. и др. Quantum decision theory in simple risky choices // PLoS One. 2016. Т. 11, № 12. С. 1–29.
187. Yukalov V.I., Sornette D. Manipulating decision making of typical agents // IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst. 2014. Т. 44, № 9. С. 1155–1168.
188. Vincent S. и др. Calibration of Quantum Decision Theory, Aversion to Large Losses and Predictability of Probabilistic Choices: 16–31. 2016. 45 с.
189. Basieva I., Khrennikov A. Decision-Making and Cognition Modeling from the Theory of Mental Instruments // The Palgrave Handbook of Quantum Models in Social Science. London: Palgrave Macmillan UK, 2017. С. 75–93.
190. Khrennikov A. Quantum-like model of unconscious–conscious dynamics // Front. Psychol. 2015. Т. 6.
191. Yukalov V.I., Sornette D. Positive Operator-Valued Measures in Quantum Decision Theory // Quantum Interaction 2014. Springer, 2015. С. 146–161.
192. Khrennikov A., Basieva I. Quantum Model for Psychological Measurements: From the Projection Postulate to Interference of Mental Observables Represented As Positive Operator Valued Measures // NeuroQuantology. 2014. Т. 12, № 3. С. 324–336.
193. Ellenberger H.F. The Discovery of the Unconscious. New York: Basic books, 1970. 932 с.
194. Khrennikov A.Y. Toward an adequate mathematical model of mental space: Conscious/unconscious dynamics on m-adic trees // BioSystems. 2007. Т. 90, № 3. С. 656–675.
195. Augusto L.M. Unconscious knowledge: A survey // Adv. Cogn. Psychol. 2010.

Т. 6, № 6. С. 116–141.
196. Blutner R., Hochnadel E. Two qubits for C.G. Jung's theory of personality // Cogn. Syst. Res. Elsevier B.V., 2010. Т. 11, № 3. С. 243–259.
197. Conte E. и др. Mental States Follow Quantum Mechanics During Perception and Cognition of Ambiguous Figures // Open Syst. Inf. Dyn. 2009. Т. 16, № 01. С. 85–100.
198. Stolarz-Fantino S. и др. The conjunction effect: New evidence for robustness // Am. J. Psychol. 2003. Т. 116, № 1.
199. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В. Историческая динамика. Взгляд с позиций синергетики. Москва, 2004. 1-18 с.
200. Khrennikov A. The principle of supplementarity: A contextual probabilistic viewpoint to complementarity, the interference of probabilities and incompatibility of variables in quantum mechanics // Found. Phys. 2005. Т. 35, № 10. С. 1655–1693.

Магистерская программа
«КОГНИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И КВАНТОВЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ»
факультета
«Информационные технологии и программирование»

Цель программы: подготовка высококвалифицированных специалистов с междисциплинарными компетенциями, объединяющими навыки естественно-научного и гуманитарного образований, для решения широкого спектра научно-технологических задач на основе передовых информационно-когнитивных технологий.

Программа запущена в 2018 году на базе Целевой поисковой лаборатории квантовой когнитивистики и интеллектуальных систем ИТМО, созданной в сотрудничестве с Фондом перспективных исследований как Всероссийский центр по развитию информационно-когнитивных технологий нового поколения. Преподавание ведётся на базе уникальных разработок лаборатории с привлечением ведущих отечественных и зарубежных специалистов в гуманитарных и естественнонаучных областях.

Основные компетенции и направления подготовки:

- ✓ Информационные технологии в науках о человеке;
- ✓ Когнитивные технологии на квантовых принципах;
- ✓ Человекоподобные системы искусственного интеллекта.

Актуальные задачи:

- – Математическое моделирование когнитивно-поведенческих процессов индивидуального и коллективного уровня;
- – Семантическая обработка и анализ информации на квантовых принципах;
- – Разработка систем искусственного интеллекта на основе квантово-подобных моделей когнитивистики человека.

Суров Илья Алексеевич
Алоджанц Александр Павлович

МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В КВАНТОВОЙ КОГНИТИВИСТИКЕ
Учебное пособие

Редакционно-издательский отдел университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано в …