

Предлагаем вниманию читателей подборку статей по материалам XIII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений», прошедшей в МГТУ им. Н. Э. Баумана 22—24 апреля 2015 г. Тематика конференции представлена следующими научными направлениями: фундаментальные проблемы физики, метрологии и теории измерений; квантовая метрология и нанометрология; измерения линейных и угловых величин, времени, частоты и их технические приложения; метрологическое обеспечение качества продукции; информационно-метрологическое сопровождение жизненного цикла функционирующих машин и механизмов; измерения в психологии и медико-биологических исследованиях; проблемы метрологии в учебном процессе.

В работе конференции приняли участие представители академической, вузовской, отраслевой науки и промышленности. С докладами выступили и выдающиеся учёные, известные на всю страну, и аспиранты, студенты, делающие в науке первые шаги.

519.7

Самоорганизация в сложных системах и новые проблемы теории измерений

Г. Г. МАЛИНЕЦКИЙ, Т. С. АХРОМЕЕВА

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия,
e-mail: GMalin@Keldysh.ru

Рассмотрены проблемы теории измерений, в решении которых принципиальную роль могут сыграть представления и модели теории самоорганизации. Особое внимание обращено на квантовые измерения в простейших системах спинтроники.

Ключевые слова: сложные системы, самоорганизация, квантовые измерения.

Some new problems of measurement theory where concepts and models of synergetics can play important role are discussed. Special attention is paid to measurement in quantum, systems.

Key words: measurement problem, complex systems, self-organization, quantum measurement, swarms and commands.

В настоящее время в науке и различных технологиях сделан важнейший шаг, который изменит постановку многих задач теории измерений. Этот шаг связан с переходом от анализа к синтезу, от изучения отдельных фрагментов некоторых объектов к исследованию целостных систем. В современных технологиях всё шире используется самоорганизация в различных масштабах, вплоть до атомного, применяются междисциплинарные подходы. При этом измерения рассматриваются не отдельно, а в контексте всей решаемой задачи. Специалисты по философии науки и техники и методологи заинтересовались этим вопросом и начали развивать представления о научной рациональности, выделив три этапа её развития: классический, не- и постнеклассический [1].

В отношении измерений можно сказать, что в классической рациональности объяснение и исследование сосредоточено только на объекте, а всё, что относится к субъекту, средствам и операциям деятельности, исключается. При-

меры — классическая механика, электродинамика, гидродинамика и многие другие теории, в которых при исправных приборах всегда должно получаться одно и то же число, являющееся ответом на поставленную задачу.

В неклассическом варианте прослеживается связь между знаниями об объекте и характером используемых средств и операций деятельности. Действительно, в теории относительности множество сущностей, связанных с пространством и временем, изменяются в зависимости от того, в какой инерциальной системе проводятся измерения. В квантовой механике процедура измерений может повлиять на состояние объекта. В хрестоматийном эксперименте с дифракцией электрона на двух щелях картина кардинально изменяется в зависимости от фиксации щели, через которую прошёл электрон.

В постнеклассической рациональности учтены соотношения знаний, полученных об объекте, не только с особенностями средств и операций деятельности, но и с постав-

ленной задачей и возможностью использования развиваемых подходов и результатов.

Рассмотрим пример, связанный с нанотехнологиями. В соответствии с [2] будущее технологического развития связано с созданием роботов, которые будут собирать роботов меньшего размера, те — микророботов, последние — нанороботов. Нанороботы будут укладывать атом за атомом, чтобы в конце концов получились абсолютные материалы, не имеющие дефектов на атомном уровне. Этот подход нереалистичен, потому что без катализаторов и множества других ухищрений, которые были придуманы за три с лишним века развития химии, многие реакции не идут или идут недопустимо медленно. Кроме того, большинство, а может быть и все системы, рассматриваемые в химии и биологии, достаточно устойчивы.

Однако главное возражение против этой идеи иное: чтобы получить достаточное количество «абсолютного материала», надо уложить число атомов, сравнимое с числом Авогадро $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23}$. Небольшому числу нанороботов, будь они созданы (при условии идеальной координации их действий), потребуется для этого время, на много порядков превышающее существование Вселенной. Самовоспроизводящиеся нанороботы (существование которых не противоречит законам природы и, как доказал Дж. Нейман, которые в принципе можно создать) находятся далеко за гранью технологических возможностей ближайшего века. Поэтому в настоящее время будет производиться то, что можно построить при прохождении пути снизу вверх — от атомных масштабов к макрообъектам — в результате самоорганизации, самоформирования, самосборки, что и подтверждает создание технологии производства фуллерена C_{60} [3].

В прикладной математике есть принцип — точность решений и используемых алгоритмов должна быть согласована с достоверностью входной информации и требованиями к точности получаемых решений. Иногда используют более жёсткую формулировку: «Слишком большое количество значащих цифр — признак низкой математической культуры». Вероятно, и в теории измерений имеет место схожая ситуация, и придётся рассматривать не отдельные измерительные приборы, а весь комплекс: измерение — вычисление — управление. Все компоненты этой триады одинаково важны и должны быть согласованы между собой.

Стоит обратить внимание на важные тенденции современной науки и технологий, которые отразятся на измерительно-вычислительных комплексах. Большая цитируемость научных работ в различных областях знаний позволяет судить о развитии фундаментальных исследований и о том, насколько велико и активно сообщество, развивающее данную область науки, и как оно оценивает перспективы этого направления. Полученные знания транслируются в прикладные исследования и опытно-конструкторские разработки. Характерные наукометрические данные представлены на рис. 1. [4]. Если общую цитируемость всего комплекса биологических дисциплин принять за 50 ед., то на химические науки будет приходиться приблизительно 10, на физику — 8, на математику и информатику — по 1,5. Следовательно, для

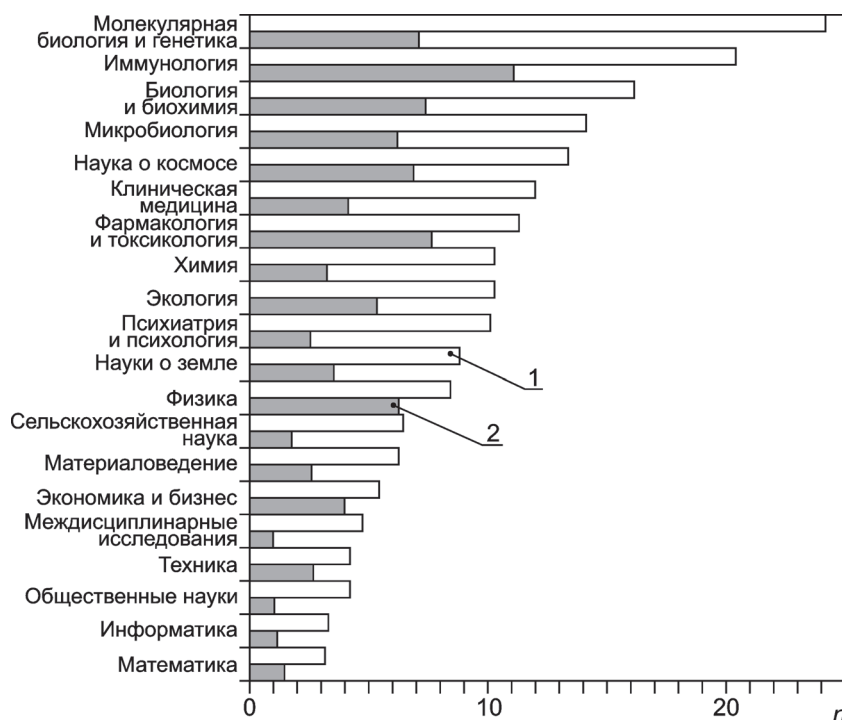


Рис. 1. Средняя цитируемость статей по различным областям науки:

1 — в среднем по миру; 2 — российские исследования

информатики и вычислительных наук переход «наука — отрасль промышленности» уже произошёл. Первая половина XXI в. должна стать эрой биологии и, соответственно, измерительные технологии будут развиваться именно в этом направлении. В настоящее время каждая третья научная работа выполняется в области медицины.

Другая тенденция — резкое уменьшение стоимости измерений. В частности, современные контроллеры ведущих мировых фирм стали дешевле 1 доллара США. Одним из самых амбициозных проектов второй половины XX в. была программа «Геном человека». В результате её выполнения стоимость секвенирования генома (установления последовательности примерно из 3 млрд. символов — А, Т, Г, Ц, соответствующих различным основаниям, определяющим наследственную информацию в ДНК) за 10 лет уменьшилась в 20 тыс. раз (рис. 2). Эта тенденция подкрепляется и экономической логикой — в США каждый доллар, вложенный в программу «Геном человека», позволил получить 140 долларов США прибыли [4].

Когда информация получена, возникает вопрос, как и на каком уровне ею воспользоваться. С одной стороны, замена одной буквы другой в некоторых позициях может оказаться критичной. С другой стороны, если на анализ и осмысление каждого основания в своём геноме человек будет тратить всего 1 с, то потребуется время, существенно превышающее продолжительность его жизни. Поэтому неизбежно эту работу придётся поручать роботам.

В разных областях исследований понятие «сложной системы», оценка числа элементов, с которых начинается «сложность» и связей между ними, индивидуально. В соответствии с этой «сложностью» возникают проблемы в теории измерений. Обратим внимание на некоторые из них.

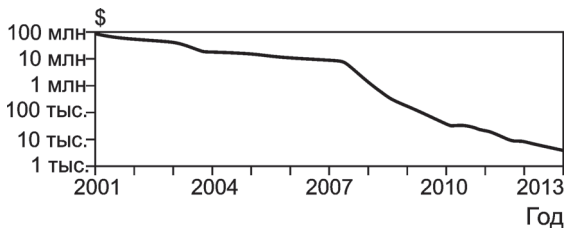


Рис. 2. Изменение стоимости секвенирования генома человека за 10 лет

Квантово-механические измерения и запутанные состояния. В вероятном будущем электронику заменит спинтроника, позволяющая осваивать терагерцовый диапазон частот и дающая принципиально новые возможности, такие как квантовые вычисления, квантовая телепортация, квантовая криптография.

Проблема измерений является наиболее важной, сложной и интересной в квантовой механике. В этой теории даже два взаимодействующих спина являются сложной системой и демонстрируют парадоксальное поведение. Новый взгляд на квантовую теорию связан с представлением о запутанности или связанности квантовых состояний и с понятием кубита. Квантовая механика, в отличие от классической, не является интуитивно очевидной теорией. Тем не менее, основные идеи спинтроники можно пояснить с помощью простых математических соображений [5].

Состояние спина микрочастицы определяется волновой функцией вида $\alpha_u|u\rangle + \alpha_d|d\rangle$. Вектор $|u\rangle$ соответствует спину,

смотрящему вверх (up), а $|d\rangle$ — вниз (down). В обычной электронике, реализованной на булевой алгебре и основанной на классическом описании объектов, есть только две возможности: $\alpha_u = 1, \alpha_d = 0$ (состояние «1») или $\alpha_u = 0, \alpha_d = 1$ (состояние «0»). Поэтому в основе существующих микросхем лежат триггеры, способные находиться в одном из двух состояний и хранить одну единицу информации — 1 бит — ответ на альтернативный вопрос «да» или «нет».

В квантово-механической системе α_u, α_d являются амплитудами вероятностей и комплексными числами, между которыми существуют взаимосвязи:

$$\alpha_u^* \alpha_u + \alpha_d^* \alpha_d = 1, \quad (1)$$

где $\alpha_u^* \alpha_u, \alpha_d^* \alpha_d$ — вероятности того, что спины смотрят вверх и вниз, соответственно.

Из (1) следует, что других возможностей нет, измерение состояния микрообъекта с вероятностью $\alpha_u^* \alpha_u$ даст значение «вверх» (единица), а с вероятностью $\alpha_d^* \alpha_d$ — вниз (нуль).

Вторая связь определяется инвариантностью этих величин относительно преобразования, сводящегося к умножению на комплексный множитель $e^{i\Theta}$, Θ — действительное число. Таким образом, вместо четырёх действительных чисел (α_u, α_d — комплексные) в силу двух связей состояние спина характеризуется двумя действительными числами, совокупность которых называют квантовым битом или кубитом.

Квантовая механика является линейной теорией, где имеет место принцип суперпозиции, в соответствии с которым микрообъект может находиться в суперпозиции состо-

яний (здесь $|u\rangle$ и $|d\rangle$). В процессе эволюции квантовой системы амплитуды вероятности α_u, α_d меняются, однако после измерений система оказывается в одном из двух состояний $|u\rangle$ или $|d\rangle$, происходит коллапс волновой функции или редукция волнового пакета: именно она позволяет определить и фиксировать состояние микрообъекта с помощью микроскопического прибора.

Аналогичным образом состояние второго спина определяется из соотношения $\beta_u|u\rangle + \beta_d|d\rangle$; $\beta_u^* \beta_u + \beta_d^* \beta_d = 1$, что также даёт два числа. Пространство состояний двух спинов можно представить как суперпозицию векторов $|uu\rangle, |ud\rangle, |du\rangle, |dd\rangle$, где первый множитель относится к первому спину.

В теории вероятностей вероятность $P(AB)$ двух независимых событий A, B получается в результате перемножения вероятностей каждого из них, т. е. $P(AB) = P(A)P(B)$. Поэтому волновая функция для системы двух независимых спинов имеет вид

$$\alpha_u \beta_u |uu\rangle + \alpha_u \beta_d |ud\rangle + \alpha_d \beta_u |du\rangle + \alpha_d \beta_d |dd\rangle.$$

Это пространство четырёхмерно: α_u, α_d задают два числа, β_u, β_d — тоже два. Такое состояние называют сепарабельным. Однако из принципа суперпозиции, применённого для системы двух спинов, следует, что в общем случае такая система описывается волновой функцией

$$\Psi_{uu}|uu\rangle + \Psi_{ud}|ud\rangle + \Psi_{du}|du\rangle + \Psi_{dd}|dd\rangle, \quad (2)$$

что даёт восемь чисел, где $\Psi_{uu}, \Psi_{ud}, \Psi_{du}, \Psi_{dd}$ — комплексные. Условие нормирования определяется из соотношения

$$\Psi_{uu}^* \Psi_{uu} + \Psi_{ud}^* \Psi_{ud} + \Psi_{du}^* \Psi_{du} + \Psi_{dd}^* \Psi_{dd} = 1.$$

Из (2) следует, что общее число переменных уменьшается на 1, а инвариантность относительно преобразования $e^{i\Theta}$ — ещё на 1. Таким образом, в общем случае пространство состояний двух спинов шестимерно, т. е. оно гораздо шире, чем пространство состояний не взаимодействующих спинов. В нём и лежат те запутанные состояния, из которых формируется информация о системе, но иногда не всё или вообще ничего невозможно узнать о состоянии её частей.

Наблюдаемым и измеряемым величинам в квантовой механике соответствуют эрмитовы операторы, например L . Предположив, что имеется множество одинаковых систем или проводятся измерения одной системы, но так, что влияние предшествующих измерений уже несущественно, можно рассматривать среднее значение L :

$$\langle L \rangle = \langle \Psi | L | \Psi \rangle,$$

где Ψ — состояние квантовой системы.

Для различных компонентов спина — наблюдаемых величин — есть свои операторы. Пусть для первого спина это будут $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, для второго — τ_x, τ_y, τ_z .

Анализ показывает, что для сепарабельных состояний

$$\langle \sigma_x \rangle^2 + \langle \sigma_y \rangle^2 + \langle \sigma_z \rangle^2 = 1; \langle \tau_x \rangle^2 + \langle \tau_y \rangle^2 + \langle \tau_z \rangle^2 = 1. \quad (3)$$

Равенства (3) означают, что измерения состояния, а также первого и второго спина содержательны.

Однако для несепарабельных состояний картина другая. Максимальная запутанность характерна для так называемого синглетного состояния

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|ud\rangle - |du\rangle),$$

для которого

$$\langle \sigma_x \rangle, \langle \sigma_y \rangle, \langle \sigma_z \rangle = 0, \langle \tau_x \rangle, \langle \tau_y \rangle, \langle \tau_z \rangle = 0; \quad (4)$$

$$\langle \tau_z \sigma_z \rangle, \langle \tau_x \sigma_x \rangle, \langle \tau_y \sigma_y \rangle = -1. \quad (5)$$

Равенство (4) означает, что многократные измерения по отдельности первого и второго компонентов системы из двух спинов с точки зрения определения их состояний, бессмысленны — они дают случайный результат. Равенство (5) представляется парадоксальным. Оно означает, что первый и второй спины направлены в противоположные стороны.

Измерив состояние одного спина, можно мгновенно получить информацию, как ориентирован другой спин, находящийся с ним в квантовом зацеплении, который может быть расположен на достаточно большом расстоянии от первого. Если же есть возможность по своему усмотрению изменять состояние «своего» спина, а затем измерять его, то появляется своеобразный канал «квантовой связи». Эта странная возможность, открытая в 1935 г., составляет парадокс Эйнштейна—Подольского—Розена. Эйнштейн говорил об этой возможности, вытекающей из основ квантовой механики, как о «призрачном действии», нарушающем постулаты теории относительности. Он полагал, что оперирование сцепленными состояниями показывает противоречивость квантовой механики и несостоятельность данной теории.

При этом в отличие от классической механики, измерения в квантовой теории играют ключевую роль. «Во что» складируется волновой пакет зависит от того, что измеряется. Одним из проявлением этого является принцип неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar/2,$$

где Δp — неопределённость в измерениях импульса микрочастицы; Δx — координаты микрочастицы в тот же момент времени; $\hbar$ — постоянная Планка.

Эту «творческую роль» измерений подтверждают эксперименты. В настоящее время широко обсуждается квантовый парадокс Зенона (его иногда называют эффектом Зенона или эффектом «сторожевой собаки»). Из классического парадокса Зенона следует, что стрела не может лететь, так как время состоит из отдельных моментов, следовательно, стрела в любой момент может находиться только в одной

определённой точке. Представления о мгновенной скорости и фазовом пространстве появились намного позже, в ньютоновскую эпоху.

Квантовый парадокс Зенона состоит в том, что частые измерения состояния квантовой системы препятствуют её переходу в другое состояние. С другой стороны, постоянные измерения — лишь способ зафиксировать данное состояние квантовой системы, если оно более предпочтительно, чем остальные.

Эволюция двухуровневой системы определяется волновой функцией

$$|\Psi(t)\rangle = c_1(t)|\Psi_1\rangle + c_2(t)|\Psi_2\rangle; c_1(0)=1; c_2(0)=0.$$

Тогда измерения, проведённые в моменты времени Δt , установят, что система находится в состоянии $|\Psi_2\rangle$ (результат 2) с вероятностью $|c_2(\Delta t)|^2 = p$ и в состоянии $|\Psi_1\rangle$ с вероятностью $|c_1(\Delta t)|^2 = q = 1 - p$ (результат 1). После измерений в результате редукции, если получен, например, результат 1 — $|\Psi_1\rangle$, то происходит возвращение в то же состояние. Иными словами, имеет место классическая модель теории вероятностей — схема Бернулли, когда вероятность серии, в которой состояние системы изменилось k раз и осталось неизменным $N - k$ раз, равно $p^k q^{N-k}$.

Предположив, что вероятность P квадратично зависит от Δt , между измерениями $P = \lambda^2 \Delta t^2 = (\lambda T/N)^2$ при большом числе измерений можно вывести вероятность сохранения исходного состояния [6]:

$$P_c = \frac{1}{2} \left[1 + \left(1 - 2 \frac{(\lambda T)^2}{N^2} \right)^N \right] = \frac{1}{2} \left(1 + e^{-2 \frac{\lambda^2 T^2}{N}} \right).$$

При $N \rightarrow \infty$ $P_c \rightarrow 1$, т. е. исходное состояние не изменяется.

В квантовых системах не только проведение измерений, но и их отсутствие даёт определённые возможности, что и положено в основу главных идей квантовых вычислений. Одной из идей является так называемая консервативная логика. В обычной логике классических систем операции «И» и «ИЛИ» необратимы — имеет место своеобразное «уничтожение» исходной информации. В квантовых или гамильтоновых системах динамика обратима, как и проводимые логические операции. Поэтому вычисления в классических гамильтоновых системах иногда сравнивают с бильярдом, в котором если заменить скорости шаров на противоположные, то в конечной возникшей конфигурации через некоторое время получатся «начальные условия». С физической точки зрения обратимость позволяет минимизировать энергетические затраты, по сравнению со случаем, когда система должна что-то «забывать» в результате диссипативных процессов.

Квантовый компьютер возрождает идею аналоговых вычислений на новом уровне. В 1980 г. советский математик Ю. И. Манин обратил внимание, что каждое состояние квантовой системы из L двухуровневых квантовых элементов (кубитов, например спинов) может находиться в суперпозиции

из двух булевых состояний, т. е. характеризуется вектором в 2^L -мерном гильбертовом пространстве. Элементарным шагом в квантовом компьютере является унитарная операция над этим вектором. В классическом компьютере это потребовало бы 2^L элементарных шагов. Изложенное выше позволяет говорить о квантовом параллелизме и надеяться на огромное ускорение вычислений, по крайней мере, для некоторых классов задач [7].

Основой для современных методов защиты информации является так называемая криптография с открытым ключом [8]. В теории вычислений принято делить задачи на простые и сложные. Если в простой задаче объём входных данных составляет N единиц (чисел, бит и т. д.), то для получения ответа в ней надо произвести не более чем N^α ($\alpha = \text{const}$) действий (иногда такие задачи также называют полиномиальными). Если зависимость числа действий Q от N более быстрая, чем степенная, то задачу называют сложной.

Криптография с открытым ключом основана на существовании односторонних функций, в которых и шифрование $y = F_K(x)$ (x — исходное сообщение, y — зашифрованное), и расшифровка $x = F_K^{-1}(y)$ при известном ключе являются простыми задачами, при неизвестном — сложными. Классическим примером такого подхода является алгоритм RSA (R. Rivest, A. Shamir, L. Adleman), в котором в качестве сложной задачи рассматривается разложение N -значного числа на простые множители. Для решения поставленной задачи на квантовом компьютере потребуется квантовый регистр из L кубит $N = 2^L$. Наилучший алгоритм разложения на множители (факторизации) для классического компьютера требует $\exp[\text{const } L^{1/3} (\log L)^{2/3}]$ операций. Таким образом, для 1000-значного числа ($L = 1000$) потребуется $\approx 10^{23}$ операций, которые классический гигафлопсный компьютер будет производить более 10 млн лет. Поэтому такую систему шифрования можно рассматривать как достаточно надёжную. Однако существование квантового компьютера меняет эту картину: для него задача становится простой, требующей $\approx L^3$ операций ($\approx 10^9$), т. е. выигрыш оказывается экспоненциальным. Алгоритм Шора, предложенный для решения этой задачи на квантовом компьютере, произвёл большое впечатление на специалистов по криптографии, квантовой механике и вычислительной математике [8].

Стоит обратить внимание на ещё одну парадоксальную возможность, связанную с использованием частиц в сцепленном состоянии для измерений. Раньше считалось, что для получения изображения предмета надо фиксировать

то, что предмет либо излучает, либо отражает. В 2014 г. в университете Вены доказали, что существует ещё одна возможность [9].

Рассмотрим два сцепленных фотона — один взаимодействует с предметом, другой проходит мимо. В силу сцепленности он «знает» о судьбе первого, взаимодействующего с объектом, и несёт информацию о предмете, с которым он не взаимодействовал. При этом, заставив его интерферировать со вспомогательной волной, можно с помощью этих фотонов получить изображение на экране. При этом могут быть спутаны фотоны с разными длинами волн. Например, рентгеновские фотоны просвечивают интересующий предмет, а вторые, находящиеся в другой части спектра, тут же формируют его изображение в видимых лучах. Для многих задач техники, биологии и медицины такие измерительные приборы были бы очень полезны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 16-01-00342, 14-01-00773).

Л и т е р а т у р а

1. Касавин И. Т. Человек. Наука. Цивилизация. К семидесятилетию академика В. С. Стёпина. М.: Канон+, 2004.
2. Фейнман Р. Ф. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики // Российский химический журнал. 2002. № 5. С. 4—6.
3. Кац Е. Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: Родословная форм и идей. М.: Изд-во «ЛКИ», 2008.
4. Малинецкий Г. Г. Чтоб сказку сделать былью... Высокие технологии — путь России в будущее. М.: ЛЕНАНД, 2015.
5. Сасскинд Л., Фридман А. Квантовая механика. Теоретический минимум. СПб.: Питер, 2015.
6. Менский М. Б. Квантовые измерения и декогеренция. Модели и феноменология. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
7. Валиев К. А., Кокин А. А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
8. Яценко В. В., Варновский Н. П., Нестеренок Ю. В., Кабатянский Г. А., Девянин П. Н., Проскурин В. Г., Черёмушкин А. В., Гырдымов П. А., Зубов А. Ю., Зязин А. В., Овчинников В. Н., Анохин М. И. Введение в криптографию / Под ред. В. В. Яценко. М.: МЦНМО: «ЧеРо», 2000.
9. Козловский Б. Портрет кота Шрёдингера // Кот Шрёдингера. 2014. № 1. С. 10—11.

Дата принятия 15.02.2016 г.