

УДК 577.3

ФОРМАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ИНТЕЛЛЕКТА В МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ О ВЛИЯНИИ НАБЛЮДЕНИЙ НА КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

© 2022 г. Л.Ю. Щурова*., #, В.А. Намиот**

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп., 53, Москва, 119991, Россия

#E-mail: ljusia@gmail.com

**Институт ядерной физики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

Поступила в редакцию 08.07.2022 г.

После доработки 08.07.2022 г.

Принята к публикации 14.09.2022 г.

Попытка математически формализовать задачу, касающуюся интеллекта, вызывает затруднения уже потому, что не имеется единого принятого всеми психологами определения понятия интеллекта. В этой работе мы подходим к задаче следующим образом: выделяем существенные особенности неформальных определений интеллекта, которые были даны психологами-экспертами, и затем на основании этих особенностей предлагаем абстрактное математическое описание понятия интеллекта. Мы находим аналогии между задачей об интеллекте и проблемой квантово-механических измерений, а затем решаем модельную задачу влияния наблюдений на процесс проникновения квантовой частицы сквозь потенциальный барьер. В рамках квантово-механического подхода с неэрмитовым гамильтонианом мы формулируем систему дифференциальных уравнений, формально отражающих концепцию интеллекта, и представляем ее аналитическое решение. На основе полученного решения модельной задачи мы обсуждаем вопрос о том, какие явления и процессы могут сопровождать процесс реализации интеллекта.

Ключевые слова: определения понятия интеллекта, математическая трактовка концепции интеллекта, влияние наблюдений на биосистемы, барьерный анти-Зенон-эффект.

DOI: 10.31857/S0006302922060266, EDN: LMTDUO

Владимир Абрамович Намиот, выдающийся ученый и замечательный человек, покинул этот мир в начале этого года. Данная статья является частью работы, которой мы с В. Намиотом занимались в последнее время, но не успели вместе подготовить материал для публикации.

Я выражаю искреннюю благодарность Владимиру Абрамовичу Намиоту за долгие годы плодотворной совместной работы.

Л. Щурова

Интеллект — часто употребляемый термин, однако определить понятие интеллекта с научной точки зрения не так просто. Может ли способность к быстрому обучению иметь определяющее значение для интеллекта? Или важнее общая сумма знаний? А как насчет склонности к абстрактному мышлению или склонности к решению задач новым неординарным способом? Или способности к выживанию в сложных жизненных обстоятельствах? Понятие интеллекта включает в

себя множество взаимосвязанных концепций, каждую из которых довольно сложно определить.

Вопрос о едином определении интеллекта, которое было бы принято сообществом психологов, до сих пор остается открытым: “*there seem to be almost as many definitions of intelligence as there were experts asked to define it*” [1] («*по-видимому, определений интеллекта почти столько же, сколько экспертов попросили дать его определение*»). Вопрос усложняется, когда мы ставим задачу абстрактно-

го математического описания понятия интеллекта.

В этой работе мы поступаем следующим образом: выделяем ключевые идеи неформальных определений интеллекта, предложенных психологами-экспертами, и на основе этих идей предлагаем формальную математическую трактовку концепции интеллекта. Мы нашли аналогии между задачей об интеллекте и задачей о влиянии наблюдений на протекание процессов в квантовых системах, и рассматриваем модельную задачу о влиянии наблюдений на процесс проникновения квантовой частицы сквозь высокий потенциальный барьер. Некоторые аспекты взаимосвязи проблемы интеллекта с проблемой наблюдений в квантовой физике рассматривались на качественном уровне в наших недавних работах [2, 3]. Здесь мы обсуждаем возможности использования различных физико-математических подходов для описания необратимых по времени процессов, имеющих принципиальное значение в эффектах, проявляющихся при наблюдении за квантовыми системами. С целью описания подобных процессов в рассматриваемой модельной задаче, мы используем квантово-механический подход с неэрмитовым гамильтонианом, в рамках этого подхода формулируем систему дифференциальных уравнений и представляем ее аналитическое решение. Мы полагаем, что уравнения и полученное решение модельной задачи формально отражают концепцию интеллекта, и, исходя из этого, выдвигаем некоторые предположения о том, какие явления и процессы могут сопровождать процесс реализации интеллекта.

НЕФОРМАЛЬНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТА

Психологи сталкиваются с проблемой определения интеллекта с тех пор, как люди начали изучать природу ума. Многие определения были даны психологами на протяжении многих лет, и, хотя эти определения различаются, тем не менее, они имеют и повторяющиеся существенные особенности. В качестве одной из важнейших особенностей авторы указывают на способность адаптироваться к окружающей реальности. Так, еще в 1905 г. А. Бине и Т. Саймон отметили, что интеллект обладает *“a fundamental faculty of adapting oneself to circumstances”* [4] (*«фундаментальной способностью приспосабливаться к обстоятельствам»*). В работах современных психологов также имеется сильный акцент на адаптацию. Так, в обзоре ведущего специалиста в области интеллекта Р.Д. Стернберга [5] приводится точка зрения Р. Пинтнера на интеллект как *“ability to adapt oneself adequately to relatively new situations in life”* [5, с. 8] (*«способность адекватно приспосабливаться к относительно новым жизненным ситуациям»*). В

работе [5] также цитируется утверждение С.С. Колвина: *“a person possesses intelligence insofar as he has learned, or can learn, to adjust himself to his environment”* [5, с. 8] (*«человек обладает интеллектом, поскольку он научился или может научиться приспосабливаться к окружению»*). Известный современный психолог и социолог Л. Готтфредсон понимает интеллект человека как *“the ability to deal with cognitive complexity”* (*«способность справляться с когнитивной сложностью»*) при взаимодействии с изменяющейся окружающей средой [6]. В обзорной работе [7], посвященной фундаментальным проблемам интеллекта, Д. Слетер отмечает, что *“intelligence is part of the internal environment that shows through at the interface between person and external environment as a function of cognitive task demands”* (*«интеллект является частью внутренней среды, которая проявляется на границе между человеком и внешней реальностью как функция требований когнитивных задач»*). Также Д. Симонтон определяет интеллект как *“a cluster of cognitive abilities that lead to successful adaptation to a wide range of environments”* [8] (*«совокупность когнитивных способностей, которые приводят к успешной адаптации к широкому кругу сред»*).

Интеллект чаще всего изучается на людях, но наблюдается также и у животных (различный интеллект животных связывают с отличающимися способностями их восприятия и когнитивного развития), и их интеллект, посредством механизмов адаптации, влияет на эволюцию животных. При этом в контексте интеллекта адаптация к окружающей реальности вовсе не означает выживание или общее количество потомков. Действительно, если бы выживание было мерой успеха адаптации, то бактерии могли бы быть самыми разумными существами на земле.

Таким образом, основной общей чертой определений понятия интеллекта является то, что интеллект рассматривается как свойство индивида, взаимодействующего с внешней средой. Другая общая черта заключается в том, интеллект связан со способностью индивида преуспевать в результате адаптации к внешней среде.

Понятие успеха подразумевает достижение какой-то цели посредством адаптации. При этом цели разных существ могут различаться, поэтому не уточняется, какова эта цель. Важно, чтобы каждый индивид был бы способен выбирать свои действия таким образом, чтобы цель была достигнута. Чем выше способность достигать успеха в отношении различных целей, тем выше интеллект индивида.

Авторы работы [9] на основании ключевых характеристик интеллекта, которые являются общими для интеллекта человека и нечеловеческих особей (и даже для искусственного интеллекта), предложили определение интеллекта в его наиболее

лее общей форме: *“Intelligence measures an agent’s ability to achieve goals in a wide range of environments”* («интеллект измеряет способность агента достигать целей в результате успешной адаптации к широкому диапазону окружающих сред»).

Для того чтобы математически формализовать степень интеллекта, авторы работы [9] предложили рассматривать модельную систему, включающую в себя агента и окружающую среду. Компонента «агент» описывает индивида, который обладает интеллектом и добивается желаемой цели посредством адаптации. В процессе активного взаимодействия с окружающей средой среда наблюдает за интеллектом агента, при этом изменения в процессе адаптации к окружению происходят в наблюдаемой системе, которой является агент.

О ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПОДХОДАХ К ЗАДАЧЕ ОПИСАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТА

Встает вопрос, в рамках какого физико-математического формализма может быть описана ситуация, в которой окружающая среда, наблюдающая агента, может оказывать влияние на процессы изменения наблюдаемой системы (на процессы изменения агента)?

В рамках классической физики считается очевидным, что наблюдение никаким образом не может повлиять на процессы в наблюдаемой системе. Тем не менее, ответ на этот вопрос не столь прост. Еще со времен Древней Греции, задолго до появления классической физики, философы (философы в те времена были и физиками) задумывались над этим вопросом и давали на него нетривиальный ответ. В пятом веке до нашей эры, древнегреческий философ Зенон Элейский приводил в своих апориях рассуждения, согласно которым внешнее наблюдение за процессом может оказывать влияние на реализацию этого процесса. Хорошо известны парадоксы Зенона: «стрела, на которую смотрят, никогда не долетит до цели», «горшок, за которым наблюдают, никогда не закипит».

Несмотря на нереальность парадоксов Зенона (их легко опровергнуть экспериментально), логический способ их опровержения найден лишь в XVII веке, после того, как И. Ньютон и Г. Лейбниц изложили идею дифференциального исчисления, которое оперирует с понятием бесконечно малых величин.

Однако несмотря на то, что парадокс Зенона отвергнут в классической физике, он все же имеет право на существование в рамках квантовой физики. Действительно, характер течения квантовых процессов существенным образом зависит от присутствия или отсутствия наблюдателя. Так, в

хорошо известном двухщелевом эксперименте с электронами частицы не образуют на экране интерференционную картину, если наблюдать, через какую щель они проходят. Но интерференционная картина на экране сохраняется, если за ходом эксперимента никто не наблюдает.

В 1977 году Б. Мизра и Д. Сударшан теоретически в рамках квантовой механики рассматривали вопрос о влиянии наблюдений на ядерный распад и показали, что непрерывное наблюдение за процессом радиоактивного распада приводит к невозможности распада [10]. Это явление, в котором наблюдение за процессом уменьшает вероятность реализации процесса, а в пределе непрерывных наблюдений делает невозможным осуществление процесса, они назвали квантовым эффектом Зенона. В настоящее время, после серии экспериментальных демонстраций (см., например, работы [11–13] и ссылки в этих работах), квантовый эффект Зенона считается реальным явлением. Заметим, что квантовый эффект Зенона представляет интерес не только для теории, но и с точки зрения его практического применения. Например, в работе [14] отмечается возможное применение этого эффекта в медицине: при нейтронной томографии квантовый эффект Зенона позволяет уменьшить интенсивность облучения и тем самым уменьшить повреждения, спровоцированные поглощенным излучением.

Однако в некоторых ситуациях возможен эффект, противоположный эффекту Зенона, то есть, когда наблюдение не уменьшает, а увеличивает вероятность наблюдаемого процесса. Этот эффект называют анти-Зенон-эффектом [15–17]. В нашей работе [18] рассмотрен барьерный анти-Зенон-эффект, который в ряде случаев позволяет существенно увеличить вероятность прохождения частицы через потенциальный барьер.

Эффект увеличения вероятности прохождения частиц через барьер за счет наблюдений представляет особенный интерес в связи с вопросом о парадоксально высокой вероятности слияния ядер в экспериментах по холодному ядерному синтезу. Хорошо известно, что в условиях холодного синтеза, оценки вероятности слияния ядер в результате «обычного» туннелирования (то есть, туннелирования в отсутствие наблюдений) дают фантастически малые величины. В связи с этим многими физиками делается вывод, что холодный ядерный синтез при нормальных температурах твердого тела невозможен, и рассматривать хоть что-либо, относящееся к нему, априори не имеет смысла.

Тем не менее имеется довольно много экспериментальных работ, выполненных разными авторами и в разных лабораториях, что позволяет рассматривать их как независимые, результаты которых свидетельствуют о существовании син-

теза новых элементов (холодного синтеза) как в твердых телах, так и в биосистемах (см., например, работы [19, 20]). Результаты этих экспериментов нельзя объяснить химическими или другими неядерными процессами, а также обычными туннельными процессами.

В работах [2, 18] показано, что значительное увеличение вероятности слияния ядер в веществе вследствие барьерного анти-Зенон-эффекта может потенциально объяснить результаты экспериментов по холодному ядерному синтезу в твердом теле, а также экспериментов по трансмутации элементов в биологических системах.

Обратимся вновь к проблеме интеллекта. Определение интеллекта требует, чтобы у агента наличествовала цель – решение новой сложной для себя задачи, а агент активно действовал, преследуя желаемую цель, взаимодействуя с наблюдающей его окружающей средой. При этом интеллект агента изменяется, достигая вследствие адаптации агента к окружающей среде уровня, необходимого для решения поставленной задачи. Промежуток времени, который требуется агенту для его целенаправленных изменений, может служить мерой интеллекта.

Действительно, возможность решить задачу немедленно – это вопрос опыта, а не интеллекта. И для того, чтобы справиться с задачей в долгосрочной перспективе, вообще не требуется большого интеллекта, например, просто перебор и использование огромного числа возможных решений могут в конечном итоге привести к желаемой цели. В принципе, за бесконечное время может быть решена любая задача. Но только никакой живой особи не дано бесконечное время пребывания на Земле. Интеллект характеризует возможность добиться цели за какое-то разумное время. Так, интеллект – это способность адаптироваться к наблюдающей его окружающей среде как можно быстрее (с учетом ограничений, налагаемых сложностью новой конкретной задачи). В этой перспективе, интеллект имеет аналогии с анти-Зенон-эффектом.

Обратим внимание, что для успешного достижения желаемой цели агент должен выделить и сохранить те изменения, которые произошли с ним в процессе взаимодействия с наблюдающим его окружением и способствовали достижению цели. Это означает, что процесс адаптации к окружающей среде представляет собой необратимый временной процесс.

Ввиду соответствия интеллекта с анти-Зенон-эффектом кажется естественным, что для абстрактной математической трактовки интеллекта следует построить формализм в рамках квантово-механической теории. Однако здесь возникают некоторые трудности. Дело в том, что возможности описания временных процессов в рамках

квантовой механики ограничены. Основным оператором квантовой механики является оператор полной энергии квантовой системы – гамильтониан: выбирая конкретный вид гамильтониана, мы тем самым формулируем на математическом языке все особенности квантовой системы. И одна из основных аксиом квантовой механики требует, чтобы гамильтониан был эрмитовым оператором, которому соответствует действительные (не комплексные) значения энергии. Очевидно, что формальное комплексное сопряжение вещественной величины не может изменить ее значение. В связи с этим квантовая механика в рамках своих основных аксиом описывает только обратимые (симметричные по времени) временные процессы [21].

Чтобы включить в рассмотрение необратимые временные процессы в квантовой системе, требуется расширение квантово-механической теории. Задача описания необратимых процессов в квантовых системах до сих пор является одной из нерешенных до конца проблем квантовой теории. В.Л. Гинзбург в работе [22] о проблемах физики на рубеже XX и XXI веков, выделил три «великие проблемы» физики, одна из которых – проблема «стрелы времени» (несимметричности по времени) в квантовой механике.

Тем не менее, поскольку все реальные процессы необратимы, в литературе имеются подходы к описанию временной необратимости в квантовых системах.

В области ядерной физики принципиально новым и существенно полезным оказался подход, в свое время предложенный Г. Гамовым для вычисления необратимого процесса альфа-распада ядра путем туннелирования через кулоновский барьер [23]. Это решение проблемы альфа-распада было, согласно Х. Бете, “*was the first successful application of quantum theory to nuclear phenomena*” [24] («первым и весьма успешным применением квантовой теории к ядерным явлениям»). В 1928 г. Гамов нашел свою знаменитую формулу – экспоненциальную временную зависимость вероятности альфа-распада ядра, используя комплексные собственные значения энергии, что, в принципе, находится в явном противоречии с основополагающими принципами квантовой теории – с требованием эрмитовости оператора Гамильтона. Тем не менее, подход Гамова оказался столь существенным, что Л. Розенфельд, один из ведущих физиков-ядерщиков двадцатого века, считал, что “*nuclear physics starts precisely with the appearance of the Gamow approach*” [25] («ядерная физика начинается именно с появления подхода Гамова»).

К настоящему времени необходимым условием реализации квантовой системы с неэрмитовым гамильтонианом является открытость квантовой системы (т.е. квантовая система должна об-

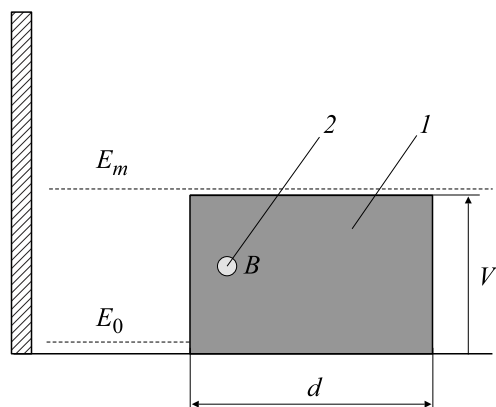


Рис. 1. Одномерная потенциальная яма для частицы A ; 1 – потенциальный барьер с шириной d и высотой V ; 2 – двухуровневая система B ; E_0 – энергия начального состояния частицы A , E_m – энергия конечного состояния частицы A .

меняться энергией и/или веществом с окружением). При этом оказалось, что можно рассматривать только интересующую нас часть всей открытой системы, а именно, взаимодействующую с окружением квантовую систему, а оставшуюся часть (окружение) – учитывать эффективно. При таком рассмотрении, динамика квантовых систем оказывается неэрмитовой. Теоретическое обоснование неэрмитового гамильтониана уже в 1930 г. нашли В. Вайскопф и Ю. Вигнер [26]. Они получили решения, из которых следует экспоненциальное затухание необратимых квантовых процессов. Показано, что в моделях с неэрмитовым гамильтонианом имеется предположение, согласно которому квантовая система изменяется при взаимодействии с окружением, а изменение самого окружения, включающего очень большое (в пределе бесконечное) число частиц, изменяется пренебрежимо мало. В настоящее время приближение неэрмитового гамильтониана (при этом весьма точное приближение) рассматривается как более широкая версия квантовой механики [27, 28]. Неэрмитовы гамильтонианы широко используются не только в контексте ядерной физики, но и в других разделах физики для описания процессов в открытых квантовых системах, в том числе необратимых туннельных процессов в твердотельных гетероструктурах [29].

В литературе, имеются также другие подходы к описанию необратимых процессов в квантовых системах. Отметим метод неравновесных функций Грина–Келдыша [30], в рамках которого влияние взаимодействий с окружением учитывается, возможно, наиболее четким образом, однако вычисления в рамках этого метода довольно сложные.

Мы в этой работе используем физически прозрачный и достаточно простой для непосредственных вычислений подход неэрмитового гамильтониана как наиболее подходящий для описания квантовых необратимых процессов в рассматриваемой модельной задаче.

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТА НА ПРИМЕРЕ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ О ВЛИЯНИИ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПРОЦЕСС ПРОХОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ЧЕРЕЗ ВЫСОКИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРЬЕР

Для того чтобы математически формализовать понятие интеллекта, рассмотрим систему, включающую в себя агента и окружающую его среду. Интеллект проявляется в ситуации, когда агент имеет цель, которую он активно преследует, и достигает желаемой цели в результате адаптации к наблюдающей его окружающей среде. Агент и среда должны иметь возможность взаимодействовать друг с другом: в процессе адаптации агент должен отправлять сигналы в среду, а также принимать сигналы, отправляемые из среды. Аналогичным образом среда должна иметь возможность принимать и отправлять сигналы агенту. Насколько высока цель агента и насколько быстро он сможет адаптироваться к окружению, настолько высок интеллект агента.

Проблема интеллекта имеет аналогии с квантово-механической задачей о влиянии наблюдений за частицей на увеличение вероятности ее проникновения сквозь высокий потенциальный барьер (с задачей о барьерном анти-Зенон-эффекте). Рассмотрим модельную задачу, которая формально демонстрирует влияние наблюдающей окружающей среды на процесс адаптации агента, обладающего интеллектом. Пусть агента представляет туннелирующая сквозь барьер частица A плюс взаимодействующая с частицей A двухуровневая система B . Окружающая среда наблюдает за состоянием двухуровневой системы B .

Допустим, что имеется прямоугольный потенциальный барьер высоты V и ширины d и пусть имеется частица A , которая первоначально (в момент времени $t = 0$) находится в состоянии $E_0 \ll V$ в широкой квантовой яме слева от барьера (рис. 1). Кроме того, имеется двухуровневая система B , находящаяся в начальный момент времени на уровне E_1 , а в результате взаимодействия с туннелирующей частицей A система B переходит в состояние $E_2 < E_1$, причем энергия такого перехода $\Delta E = E_2 - E_1$ удовлетворяет условию

$$\Delta E \ll V. \tag{1}$$

Обратим внимание, что если бы выполнялось противоположное неравенство ($\Delta E > V$), то имела

бы место тривиальной ситуации, когда частица A в результате взаимодействий с системой B , даже при отсутствии каких либо наблюдений, оказалась бы в надбарьерном состоянии и свободно пролетела бы через барьер.

Мы рассматриваем ситуацию, когда окружающая система наблюдает, перешла ли система B в состояние E_2 или все еще находится в состоянии E_1 . При таком наблюдении можно получить информацию, что происходит с частицей A , которая взаимодействует с системой B . Наша цель – показать, что даже при выполнении условия (1), когда энергии ΔE заведомо недостаточно для перехода частицы A в надбарьерное состояние, наблюдение за системой B увеличивает вероятность перехода частицы A сквозь потенциальный барьер.

Перейдем к вычислению вероятности процесса, в результате которого частица A из-за взаимодействий с системой B , за состоянием которой происходит наблюдение, окажется в состоянии с энергией E_m , превышающей высоту барьера V .

Временные зависимости в системе взаимодействующих квантовых состояний описываются нестационарным уравнением Шредингера:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_i(r,t)}{\partial t} = H \Psi_i(r,t), \quad (2)$$

где гамильтониан $H = H_0 + H'$ содержит невозмущенную часть H_0 , а также гамильтониан возмущения H' , описывающий взаимодействия, в результате которых со временем изменяется как состояние двухуровневая системы B , так и состояние частицы A .

Будем полагать, что в уравнении (2) $\Psi_i(r,t) = \Phi_i(r)\varphi_i(t)$, где $\Phi_i(r)$ – пространственная часть волновой функции, соответствующая невозмущенному гамильтониану H_0 . Временная эволюция рассматриваемой системы может быть выражена вектором $\varphi(t) = (\varphi_{01}(t), \varphi_{m2}(t))$. Здесь $\varphi_{01}(t)$ – амплитуда вероятности нахождения в момент времени t частицы A на уровне E_0 и системы B на уровне E_1 . Пусть конечное состояние E_2 системы B представляет собой состояние квази непрерывного спектра (аналогичное квазинепрерывным состояниям в широких квантовых ямах [29]): со-

стояние E_2 включает плотную систему дискретных уровней $E_2^{(j)}$: $E_2 = (E_2^{(1)}, \dots, E_2^{(j)}, \dots, E_2^{(n)})$; $\varphi_{m2}(t)$ – амплитуда вероятности нахождения частицы A в момент времени t в надбарьерном состоянии на уровне E_m и системы B на одном из уровней $E_2^{(j)}$.

Временная зависимость функции $\varphi(t)$ задается системой уравнений

$$\begin{cases} i\hbar \frac{d\varphi_{01}(t)}{dt} = (E_0 + E_1)\varphi_{01}(t) + \Omega_{12}^{(j)}\varphi_{m2}(t), \\ i\hbar \frac{d\varphi_{m2}(t)}{dt} = (E_m + E_2^{(j)})\varphi_{m2}(t) + \sum_j \Omega_{21}^{(j)}\varphi_{01}(t). \end{cases} \quad (3)$$

В системе уравнений (3) $\Omega_{12}^{(j)} = \Omega_{12}(E_2^{(j)})$ – матричный элемент перехода системы B из состояния E_1 на один из квазиуровней $E_2^{(j)}$ в результате взаимодействия с частицей A ; $\Omega_{12}^{(j)} = \Omega_{21}^{(j)} = \Omega_B$. Конкретный вид оператора Ω_B мы фиксировать не будем (подобно тому, как это было сделано в работе [18]).

С целью приведения системы дифференциальных уравнений (3) к алгебраическому виду мы используем следующие преобразования

$$\tilde{\varphi}(E) = \int_0^\infty \exp\left(i\frac{E}{\hbar}t\right)\varphi(t)dt, \quad (4)$$

где E – комплексная переменная, $\tilde{\varphi}(E)$ представляют изображения оригиналов функций $\varphi(t)$. При использовании преобразований (4) система (3) сводится к системе алгебраических уравнений для изображений $\tilde{\varphi}(E)$. При начальных условиях $\varphi_{01}(t=0) = \varphi_{01}(0) = 1$ и $\varphi_{m2}(0) = 0$ система уравнений для $\tilde{\varphi}(E)$ принимает вид

$$\begin{cases} i\hbar = (E - E_0 - E_1)\tilde{\varphi}_{01}(E) - \Omega_B\tilde{\varphi}_{m2}(E), \\ 0 = (E - E_m - E_2^{(j)})\tilde{\varphi}_{m2}(E) - \sum_j \Omega_B\tilde{\varphi}_{01}(E). \end{cases} \quad (5)$$

Из второго уравнения системы (5) следует $\tilde{\varphi}_{m2}(E) = \tilde{\varphi}_{01}(E) \sum_j \frac{\Omega_B}{E - E_m - E_2^{(j)}}$. Тогда первое уравнение системы (5) сводится к уравнению

$$i\hbar = (E - E_0 - E_1)\tilde{\varphi}_{01}(E) - \tilde{\varphi}_{01}(E) \sum_j \frac{\Omega_B^2}{E - E_m - E_2^{(j)}}. \quad (6)$$

Поскольку конечные состояния частицы B есть квази непрерывного спектра, заменим сумму по j -м состояниям интегралом $\sum_j \rightarrow \int \rho_B dE_2$,

где ρ_B – плотность конечных состояний системы B , и перепишем последнее слагаемое в правой части уравнения (6) в виде

$$\tilde{\phi}_{01}(E) \sum_j \frac{\Omega_B^2}{E - E_m - E_2^{(j)}} \approx \tilde{\phi}_{01}(E) \int dE_2 \rho_B \frac{\Omega_B^2}{E - E_m - E_2}.$$

Будем полагать, что Ω_B и ρ_B имеет слабую зависимость от энергии, тогда

$$\int dE_2 \rho_B \frac{\Omega_B^2}{E - E_m - E_2} = \rho_B \Omega_B^2 \int dE_2 \frac{1}{E - E_m - E_2}. \quad (7)$$

Интеграл по E_2 удобно вычислять, рассматривая его как контурный интеграл в комплексной плоскости. Путь интегрирования проходит в основном вдоль вещественной оси, и контур интегрирования замыкаем бесконечной полуокружностью в верхней полуплоскости. Поскольку в уравнении (7) подынтегральная функция (ее аналитическое продолжение) имеет только один полюс $E_2 = E - E_m$ на вещественной оси, который дает вклад в интеграл, получаем

$$\rho_B \Omega_B^2 \int dE_2 \frac{1}{E - E_m - E_2} = \Delta + i\pi \rho_B \Omega_B^2 \approx -i \frac{\Gamma_B}{2}. \quad (8)$$

Здесь действительная часть Δ описывает энергетический сдвиг уровней, причем $\Delta \ll E_2, E_1$, и величина Δ может быть просто включена в значения уровней. (Энергия Δ поглощается путем переопределения энергетических уровней, и будем

полагать, что $\Delta \rightarrow 0$.) Сингулярная часть $i\pi \rho_B \Omega_B^2$, согласно «золотому правилу Ферми», есть $i\pi \rho_B \Omega_B^2 \approx -i \frac{\Gamma_B}{2}$, где $\Gamma_B = \hbar/\tau_B$, τ_B – характерное время перехода системы B из начального в конечное состояние в результате взаимодействий с частицей A .

С учетом уравнения (8) уравнение (6) преобразуется к виду

$$i\hbar = \left(E - E_0 - E_1 + i \frac{\Gamma_B}{2} \right) \tilde{\phi}_{01}(E). \quad (9)$$

Подставляя выражение для $\tilde{\phi}_{01}(E)$, которое следует из уравнения (9), во второе уравнение системы (5), получаем

$$\tilde{\phi}_{m2}(E) = \frac{i\hbar \Omega_B}{(E - E_0 - E_1 + i\Gamma_B/2)(E - E_m - E_2)}.$$

Используя преобразование, обратное преобразованию (4),

$$f(t) = \frac{1}{2\pi\hbar} \int \tilde{f}(E) \exp(-iEt) dE,$$

получаем

$$\phi_{m2}(t) = \frac{\Omega_B}{(E_m + E_2) - (E_0 + E_1) + i\Gamma_B/2} \left(e^{-i(E_m+E_2)t/\hbar} - e^{-i(E_0+E_1)t/\hbar - \Gamma_B t/2\hbar} \right). \quad (10)$$

Тогда вероятность того, что в момент времени t (после начала наблюдения при $t = 0$) частица A на-

ходится выше барьера на уровне E_m , а система B – на одном из уровней $E_2^{(j)}$ состояния E_2 , имеет вид

$$p_{m2}(t) = \phi_{m2}(t) \phi_{m2}^*(t) = \frac{\Omega_B^2}{(E_m - E_0 + \Delta E)^2 + \Gamma^2/4} \left[1 - 2 \cos\left(\frac{E_m - E_0 + \Delta E}{\hbar} t \right) e^{-\Gamma_B t/2\hbar} + e^{-\Gamma_B t/\hbar} \right], \quad (11)$$

где $\Delta E = E_2 - E_1$ – энергия перехода системы B .

Пусть за время наблюдения Δt , прошедшее с начала наблюдения, был зарегистрирован сигнал, фиксирующий переход в системе B . Очевидно, что интервал времени Δt значительно превышает величину $\tau_B = \hbar/\Gamma_B \sim \hbar/\Delta E$, и, кроме того, энергия $E_m \gg E_0, \Delta E, \Gamma$. В этом случае выражение (11) упрощается, и вероятность того, что за время наблюдения $\tau = \Delta t \gg \tau_B$ система B будет обнаружена на уровне $E_2^{(j)}$, в то время как частица A окажется в состоянии выше барьера, которому соответствует энергия E_m , может быть представлена в виде

$$p_{2m} \approx \frac{\Omega_B^2}{E_m^2}, \quad (12)$$

где значение E_m близко к величине высоты барьера V . Как следует из выражения (12), величина p_{2m} быстро убывает с увеличением высоты барьера, поэтому, казалось бы, даже при наличии наблюдений вероятность появления частицы A состояний $E_m \geq V$ всегда будет мала. Однако сравним величину p_{2m} , которая следует из выражения (12), с вероятностью p_d того, что частица, за которой не наблюдают (то есть без участия системы B , взаимодействующей с частицей A , и в отсутствие на-

блюдений за системой B), протуннелирует сквозь барьер высоты V и окажется в области справа от барьера. Тогда в случае барьера прямоугольной формы и ширины d вероятность того, что частица с энергией, величина которой много меньше высоты барьера V , в результате туннелирования окажется в области справа от барьера, дается выражением

$$p_d \approx \exp(-2d\sqrt{2mV} / \hbar). \quad (13)$$

Вероятность p_d в выражении (13) экспоненциально быстро убывает с ростом V и d , и для высоких значений V величина вероятности p_{2m} в выражении (12), убывающая степенным образом как $p_{2m} \sim V^{-2}$, может значительно превосходить вероятность $p_d \sim \exp(-d\sqrt{V})$ (возможно, даже на много порядков величины). Кроме того, вероятность p_{2m} в выражении (12) вообще не зависит от ширины барьера. Дело в том, что p_{2m} описывает вероятность попадания частицы A в область за барьером в условиях, когда за частицей A и системой B ведется наблюдение. Обычно влияние наблюдения проявляется в том, что волновая функция, описывающая наблюдаемую систему, испытывает коллапс. В результате этого коллапса (стягивания волновой функции) частица A приобретает свойства классической частицы. Существенно, что если в результате наблюдений частица A зарегистрирована в состоянии с энергией E_m , превосходящей высоту барьера V , то такая частица уже не попадет в барьер (как классически запрещенную область энергий) и туннелировать не будет. Оказавшись в надбарьерном состоянии, в дальнейшем частица уже имеет шанс свободно пролететь над барьером и с вероятностью p_{2m} попасть в область справа от барьера. При этом если частица попала в надбарьерное состояние, то вероятность того, что она проникнет и в область за барьером оказывается существенно больше, чем вероятность p_d проникнуть в эту же область за счет туннелирования, при котором частица проходит всю область барьера в подбарьерном состоянии. В этом и состоит суть барьерного анти-Зенон-эффекта: когда вероятность туннелирования частиц весьма мала, наблюдение за частицами может значительно увеличить вероятность прохождения барьера.

Особенный интерес представляет ситуация, когда из-за малой вероятности «обычного» туннелирования проникновение частицы сквозь барьер оказывается практически неосуществимым за разумные времена, но переход через барьер вследствие анти-Зенон-эффекта вполне возможен. Так, в работах [2, 18], уже рассмотрение барьерного анти-Зенон-эффекта на качественном уровне, позволило показать, что этот эффект мо-

жет иметь непосредственное отношение к явлению холодного ядерного синтеза. В этой работе получено аналитическое выражение для временной зависимости вероятности перехода частицы вследствие барьерного анти-Зенон-эффекта (формула (11)).

Обсудим вопрос о том, каким образом при регистрации внешним устройством кванта с энергией $\Delta E \ll E_m$, соответствующей энергии перехода в системе B , оказалось возможным появление состояний частицы A с энергией $E_m \gg \Delta E$.

Если частицу A вместе с системой B рассматривать как подсистему, изолированную от внешнего окружения, то в ней, в силу закона сохранения энергии для изолированных подсистем, никогда не появятся состояния с энергией E_m , так как энергии системы B для подобного перехода просто недостаточно. Но в рассмотренной здесь задаче за состоянием частицы A и системой B производится наблюдение внешним устройством, имеющее целью установить, на каком уровне находится система B (и частица A). Это означает, что частица A и система B никоим образом не могут считаться изолированными от внешнего окружения, и сохраняется только полная энергия, включающая в себя также и энергию окружающей реальности. В процессе наблюдения изменяется не только наблюдаемая система, но и сама наблюдающая окружающая реальность. А поскольку окружающая среда всегда находится по каким-то параметрам в неустойчивом состоянии (если бы среда была полностью устойчивой, то никакие измерения в ней были бы невозможны), то даже малые воздействия могут вызвать ее существенное изменение. Таким образом, источником высокой энергии E_m служат объекты, относящиеся к окружающей среде и обладающие, в принципе, сколь угодно большими запасами энергии. Однако неизвестно, даже в принципе, каким образом описывать конкретные процессы, происходящие в наблюдающей внешней среде.

В рамках подхода неэрмитового гамильтониана окружение учитывается эффективно, что позволяет в рассмотренной задаче при описании процессов, происходящих с частицей A и системой B , учитывать энергию, поступающую из внешней среды, наблюдающей эти процессы, но в то же время — не включать в описание процессы, происходящие в самой наблюдающей системе. Обсудим на качественном уровне, какие объекты окружающей среды могут являться источниками высокой энергии в рассматриваемой задаче.

В задаче о влиянии наблюдений на вероятность прохождения частицей барьера в твердом теле, источником высокой энергии служит объект внешней среды — устройство, которое регистрирует сигнал, вызванный квантом излучения при переходе системы B на более низкий уровень

энергии (при этом мы получаем информацию о переходе частицы A в надбарьерное состояние). Поскольку энергия взаимодействия каждого отдельного кванта с регистрирующим устройством слишком мала, то, чтобы его можно было заметить непосредственно, в подобных устройствах всегда используются всевозможные усилители сигнала. При регистрации даже слабый сигнал, будучи соответствующим образом усилен, вызывает в наблюдающей системе (которая есть объект внешней среды) заведомо регистрируемые и, следовательно, достаточно большие изменения.

Цель любого наблюдения состоит в том, чтобы получить информацию о наблюдаемой системе, но невозможно получить информацию о квантовой системе и совершенно не повлиять на нее. Анти-Зенон-эффект потому и возникает, что когда произошла регистрация и связанные с регистрацией изменения в наблюдающей системе, одновременно и с неизбежностью осуществляется и воздействие на наблюдаемую квантовую систему, изменяющее состояние как системы B , так и состояние взаимодействующей с ней частицы A . Это особенность квантовой механики. В результате такого воздействия наблюдающего окружения частица A получает энергию E_m , превосходящую высоту барьера. При этом происходит коллапс волновой функции, и с вероятностью, даваемой формулой (12), частица может проникнуть в область справа от барьера. Важно, что если мы исключаем возможность наблюдения за квантовой системой, то мы тем самым исключаем и возможность появления состояний с высокими значениями E_m и коллапса волновой функции, а также всего того, что с этим коллапсом связано, в том числе возможности преодоления высокого барьера.

Обратимся вновь к проблеме интеллекта (будем иметь в виду интеллект человека). Пусть цель индивида, которую ставит перед собой индивид, представляет собой задачу на самом высоком, но преодолимом уровне возможностей — как возможностей его адаптации к окружению, так и возможностей наблюдающей индивида окружающей среды. Имея в виду аналогии с изложенной выше задачей о проникновении частицы сквозь потенциальный барьер, индивиду на пути к достижению цели требуется преодолеть высокий «потенциальный барьер», «энергия» которого значительно превышает первоначальный «уровень» индивида. Такую энергию индивид может получить только из наблюдающей его окружающей среды в процессе адаптации к окружению.

Возникает вопрос: какие объекты окружающей среды могут служить источником высокой энергии, необходимой для достижения индивидом цели?

Очевидно, что индивид не может получить столь высокую энергию от окружения «себе подобных», имеющих уровень, сравнимый с уровнем его первоначального состояния. Значит, для того чтобы индивид смог бы достичь своей цели, какие-то другие объекты и среды окружающей реальности должны обеспечить ему требуемую энергию.

Гипотеза о возможных источниках высокой энергии выглядит на первый взгляд достаточно необычно. Мы полагаем, что такими источниками могут быть свет далеких звезд (космические лучи) или даже вакуум.

Галактические космические лучи — потоки заряженных частиц, которые постоянно прилетают к Земле из-за пределов Солнечной системы, словно никогда не прекращающийся дождь, — имеют энергию в широком диапазоне, вплоть до сверхвысоких энергий порядка $\sim 10^{14}$ МэВ. При этом в интегральном потоке наиболее представлены космические лучи с энергиями в диапазоне 300–500 МэВ/нуклон. Известно, что при воздействии космических лучей с подобной энергией возможны генетические нарушения, а также изменения когнитивной эффективности, сохраняющиеся на длительное время [31].

Что касается вакуума, то с точки зрения квантовой физики вакуум не является пустым пространством, а содержит постоянно появляющиеся, взаимодействующие и исчезающие виртуальные частицы (флуктуации вакуума). Вакуум представляет собой квантовое состояние с минимально возможной энергией, однако энергия квантовых флуктуаций вакуума — виртуальных частиц — совсем не мала. Виртуальные частицы, существующие в течение очень короткого интервала времени δt_V , могут иметь весьма высокую энергию $\delta E_V = \hbar/\delta t_V$. Давно известно, что флуктуации вакуума приводят к экспериментально наблюдаемым эффектам, таким как лэмбовский сдвиг уровней энергии водородоподобных атомов, обусловленный взаимодействием атома с вакуумными флуктуациями, и эффект Казимира, заключающийся во взаимном притяжении тел под действием вакуумных флуктуаций. Отметим, что согласно современным космологическим моделям, именно благодаря высокоэнергетическим вакуумным флуктуациям сформировались галактики во Вселенной [32].

Мы живем в окружающей нас реальности, где из всех типов взаимодействий лидером является электромагнитное взаимодействие. При этом все электромагнитные взаимодействия между физическими объектами, а также взаимодействия между электромагнитным полем и реальными объектами опосредуют кванты электромагнитного поля — виртуальные фотоны вакуума [33]. Более того, именно виртуальные фотоны обуслав-

ливают квантовые свойства реальных физических объектов. Это связано с характерной особенностью виртуальных фотонов всегда, независимо от их энергии $\Delta E_V = h\omega_{ph}$, переносить и передавать реальным объектам одну и ту же величину количества действия $S = h\omega_{ph}\delta t_{ph}$ (где $h = 2\pi\hbar$, δt_{ph} – время жизни виртуального фотона). Воздействие виртуальных фотонов на реальные физические объекты приводит к возникновению неопределенностей их динамических переменных, которые описываются квантовыми соотношениями неопределенностей и обуславливают квантовые свойства реальных физических объектов. При этом неопределенности квантовых величин физических объектов, вызванные воздействием виртуальных фотонов различных энергий $h\omega_{ph}$, различны и соответствуют энергии и временным параметрам виртуальных фотонов. Воздействие высокочастотных виртуальных фотонов ведет к значительным отклонениям энергии реальных объектов от величины их первоначальной энергии, но длительность δt_{ph} процесса изменения энергии в этом случае весьма мала. (В нашей недавней работе [34] имеется детальное обсуждение того факта, что виртуальные фотоны придают квантовые свойства взаимодействующим с ними физическим объектам.)

Таким образом, в проблеме интеллекта в качестве источника высокой энергии, необходимой для осуществления процесса адаптации индивида, могут служить различные объекты и среды, относящиеся ко всей окружающей реальности, чьи суммарные запасы энергии, в принципе, безграничны. Однако, поскольку барьерный анти-Зенон-эффект проявляется только в квантовых системах, роль виртуальных фотонов вакуума, которые обуславливают квантовые свойства физическим объектам и могут при воздействии передавать достаточно большую энергию, представляется особенно важной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы живем в физическом мире, где процессы, касающиеся понятия интеллекта, должны подчиняться тем же законам физики, как и все во Вселенной.

В этой работе мы ставили цель формальной математической трактовки концепции интеллекта. Для этого мы рассмотрели имеющиеся в литературе неформальные определения интеллекта, которые были даны экспертами-психологами, и выяснили, что ключевой характеристикой интеллекта индивида является его способность к адаптации к окружающей среде. Ввиду того, что процесс адаптации предполагает активное взаимодействие индивида с наблюдающей его внешней средой, мы нашли аналогии проблемы интеллек-

та с задачей квантово-механических измерений. Мы показали, что формальное описание концепции интеллекта может быть продемонстрировано в модельной квантовой задаче о влиянии наблюдений на увеличении вероятности прохождения частицы сквозь высокий потенциальный барьер (барьерный анти-Зенон-эффект). В рамках квантово-механического подхода с неэрмитовым гамильтонианом мы сформулировали систему дифференциальных уравнений, формально отражающих процесс реализации интеллекта, и представили ее аналитическое решение. На основе полученного здесь решения модельной квантово-механической задачи, мы обсуждаем вопрос о том, какие явления и процессы, сопровождающие целенаправленные действия индивида, могут иметь, с точки зрения интеллекта, определяющее значение. Мы выделяем как наиболее существенные те процессы, которые обусловлены вакуумными виртуальными фотонами.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. L. Gregory, *The Oxford Companion to the Mind* (Oxford University Press, Oxford, UK, 1998).
2. В. А. Намиот и Л. Ю. Щурова, *Биофизика*, **63** (5), 2027 (2018).
3. V. Namiot and L. Shchurova, *NeuroQuantology*, **17** (9), 1 (2017).
4. A. Binet and T. Simon, *L'Annee Psychologique*, **11**, 191 (1905).
5. R. J. Sternberg, In *Handbook of Intelligence*, Ed. by R. J. Sternberg (Cambridge University Press, Cambridge, 2000), pp. 3–15.
6. L. S. Gottfredson, *J. Cognitive Educat. Psychol.*, **4** (1), 23 (2004).
7. J. Slatter, *Assessment of Children Cognitive Foundations and Applications* (Jermone M. Satler Publ., San Diego, 2018).
8. D. K. Simonton, In *Human intelligence: Historical influences, current controversies, teaching resources*, Ed. by J. A. Plucker (2003); https://intelltheory.com/simonton_interview.shtml.
9. S. Legg and M. Hutter, *Minds and Machines*, **17** (4), 391 (2007).
10. B. Misra and E. C. G. Sudarshan, *J. Math. Phys.*, **18** (4), 756 (1977).

11. R. J. Cook, *Phys. Scr. T*, **21**, 49 (1988).
12. W. M. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger, and D. J. Wineland, *Phys. Rev. A*, **41** (5), 2295 (1990).
13. O. Hosten, M. T. Rakher, J. T. Barreiro, et al., *Nature (London)*, **439**, 949 (2006).
14. P. Facchi, Z. Hradil, G. Krenn, et al., *Phys. Rev., A* **66** (1), 012110 (2002).
15. B. Kaulakys and V. Gontis, *Phys. Rev. A*, **56** (2), 1131 (1997).
16. A.G. Kofman and G. Kurizki, *Nature (London)*, **405**, 546 (2000).
17. K. Koshino and A. Shimizu, *Phys. Rep.*, **412** (4), 191 (2005).
18. V. A. Namiot and L. Y. Shchurova, *Int. J. Mod. Phys. B* **31** (11), 1750069 (2017).
19. S. Lipinski and H. Lipinski, *Hydrogen-Lithium Fusion Device* (Int. Patent WO 2014/189799 A9, 2014).
20. В. И. Высотский и А. А. Корнилова, *Ядерный синтез и трансмутация элементов в биологических системах* (Мир, М., 2003).
21. I. Prigogine and I. Stengers, *Order out of chaos: Man's new dialogue with nature* (Heinemann, London, 1984).
22. В. Л. Гинзбург, *Успехи физ. наук*, **177** (4), 346 (2007).
23. G. Gamow, *Z. Phys.*, **51**, 204 (1928).
24. H. A. Bethe, *Rev. Mod. Phys.*, **9** (2), 161 (1937).
25. L. Rosenfeld, *Cosmology, Fusion and Other Matters: George Gamow Memorial Volume* (Colorado Associated University Press, Boulder, 1972).
26. V. F. Weisskopf and E. P. Wigner, *Z. Phys.*, **63**, 54 (1930).
27. P. Exner, *Open Quantum Systems and Feynman Integrals* (Springer, Dordrecht, 1985).
28. C. M. Bender, *Rep. Prog. Phys.*, **70** (6), 947 (2007).
29. L. Yu. Shchurova and V. N. Murzin, *J. Russ. Laser Res.* **42** (6), 632 (2021).
30. Л. В. Келдыш, *Журн. эксперим. и теорет. физики*, **47** (4), 1515 (1964).
31. J. A. Chowen and L. M. Garcia-Segura, *Prog. Neurobiol.*, **184**, 101720 (2020).
32. V. F. Mukhanov, *Physical foundations of cosmology* (Cambridge University Press, Cambridge/New York, 2005).
33. Р. Фейнман, *Квантовая электродинамика* (URSS, Москва, 2009).
34. V. N. Murzin and L. Yu. Shchurova, *J. Russ. Laser Res.* **41** (6), 597 (2020).

Formal Mathematical Description of Intelligence Concept in a Model Problem on the Influence of Observations on Quantum Processes

L.Yu. Shchurova* and V.A. Namiot**

*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, Moscow, 119991 Russia

**Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

An attempt to mathematically formalize the problem of intelligence causes difficulties, if only because there is no single definition for intelligence adopted by all psychologists. In this work, this problem is addressed in the following way: through highlighting the essential features of the informal definitions of human intelligence that have been given by expert psychologists, it is conducive to put forward an abstract mathematical description of intelligence. Analogies between the problem of intelligence and the problem of quantum mechanical measurements are found, and then the solution to a model problem on the influence of observations on a process of quantum tunneling of particles through a potential barrier is given. Within the framework of the quantum mechanical approach with a non-Hermitian Hamiltonian, a system of differential equations, which formally reflect the concept of intelligence, is formulated, and its analytical solution is presented. On the basis of the obtained solution of the model problem, this paper discusses the question of what phenomena and processes can accompany a process of the realization of intelligence.

Keywords: definitions of intelligence, mathematical description of intelligence, influence of observation on biological systems, barrier anti-Zeno effect