ПСИХОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2008, том 29, № 4, с. 84–97

ПСИХОФИЗИКА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УВЕРЕННОСТИ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЯ В СЕНСОРНЫХ ЗАДАЧАХ

© 2008 г. В. М. Шендяпин*, И. Г. Скотникова, В. А. Барабанщиков***, В. Б. Тарасов******

** Программист центра экспериментальной психологии МГППУ, Москва;*
e-mail: valshend@yandex.ru

*** Кандидат психологических наук, старший научный сотрудник лаборатории системных исследований психики Института психологии РАН, Москва;*
e-mail: iris236@yandex.ru

**** Член-корреспондент РАО, доктор психологических наук, профессор, зав. лабораторией системных исследований психики Института психологии РАН, Москва;*
e-mail: sbar@psychol.ru

***** Кандидат технических наук, доцент, зам. начальника отдела "Компьютерные системы автоматизации" МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва;*
e-mail: tarasov@rk9.bmstu.ru

Развивается математическая модель процесса решения человеком задачи сенсорного различения, включающего оценку уверенности в правильности решения. Уверенность выполняет в модели функцию внутреннего контроля принимаемых решений. Контроль опирается на инструкции, штрафы за ошибки и опыт ранее принятых решений, зафиксированные в референтном уровне уверенности.

Ключевые слова: математическое моделирование, принятие решения, уверенность, сенсорное различение.

Изучение принятия решения (*ПР*) как базового звена любой деятельности человека – одна из центральных проблем психологии. Актуальность этой проблемы в настоящее время связана с резким ростом психологических нагрузок, обусловленных необходимостью принимать ответственные решения в ситуациях с неопределенностью, вызванной дефицитом или избытком входной информации. Поэтому для таких ситуаций характерна субъективно переживаемая сомнительность в правильности принимаемых решений, что свойственно большинству видов сложной практической деятельности (руководителей, операторов, врачей, педагогов, юристов, экспертов и др.).

Исследование механизмов *ПР* и их моделирование стремительно развиваются в зарубежной и отечественной науке начиная с середины XX в. [8, 10, 14, 20, 38, 40]. Несколько позднее появились работы, направленные также на изучение и формальное описание уверенности (*Ув*) в принятом решении. Оно проводится на материале заданий на общую осведомленность человека (уровень его знаний [10, 26]) и на *пороговое сенсорное различение* [12, 22–25, 27, 30, 32, 37, 44, 45], применительно к которому ведется настоящая работа. Задачи на различение относятся к базовому, исходному уровню когнитивной сферы человека – сенсорно-перцептивному. Различение порогового типа представляет собой предельную для человека ситуацию: для сравнения предъявляются очень сходные между собой и потому едва различимые признаки объекта. В этом случае весьма острым является дефицит поступающей сенсорной информации, т.е. высока субъективная неопределенность, что вызывает у человека неуверенность, сомнения в ходе решения. Именно для задач сенсорного различения за рубежом разработан ряд математических моделей *ПР* с оценкой *Ув* (см. раздел II). Вместе с тем в этих моделях дается преимущественно формальное описание собственно механизмов *ПР* и *Ув*, тогда как другие функциональные компоненты процесса выполнения задачи различения (сенсорный анализ, контроль и обратная связь) рассматриваются минимально.

Целью настоящего исследования является разработка математической модели *целостного процесса решения сенсорной задачи* порогового различения близких по величине признаков объектов с наиболее детальным описанием ключевого компонента этого *процесса – ПР и оценки Ув в его правильности.*

Реализация поставленной цели на данном этапе исследования предполагает выполнение следующих *задач*: 1. Определить основные концептуальные представления, необходимые для разработки

модели. 2. Охарактеризовать общую структуру процесса решения задачи сенсорного различения. Выделить основные функциональные блоки этого процесса. 3. Разработать формальные модели выделенных блоков с акцентом на подробное описание блока *ПР* и оценки *Ув* в его правильности.

I. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ И УВЕРЕННОСТИ В СЕНСОРНЫХ ЗАДАЧАХ

Различение близких по величине признаков объектов – это один из трех основных видов сенсорных задач, имеющий наиболее общий характер, тогда как обе другие задачи (обнаружение и опознание) по своему психологическому содержанию представляют собой частные случаи различения [4]. Подобные задачи изучаются психофизикой, а в практической деятельности типичны для операторов информационных панелей, разработчиков видео- и аудиотехники, врачей, занимающихся диагностикой и коррекцией зрения и слуха, рентгенологией, и т.п. Различение бывает двух типов: с ответами "больше/меньше (равно)" и с ответами "одинаковые/разные". Последнее широко распространено не только среди сенсорных задач, но и при сравнении ("такой/не такой" – "*same*/*different*") любых объектов или их качеств, выраженность которых не обязательно измеряется физическими величинами (например, сравнение изображений лиц людей). Однако, несмотря на это, для данного типа различения процессы *ПР* и оценки *Ув* изучены гораздо меньше, чем для различения "больше/меньше".

Ранее одним из авторов был проведен развернутый анализ психологического содержания феномена "уверенность", современного состояния изучения его роли в принятии решения и данных собственных экспериментальных исследований на материале сенсорного различения [11, 12]. Настоящая статья посвящена разработке математической модели *Ув* в правильности принятого решения, впервые осуществляемой в отечественной науке.

Кратко изложим основные сведения, имеющие отношение к исследованиям *Ув* в процессе *ПР*.

Ключевая проблема в исследованиях *Ув* человека в правильности своих решений состоит в том, насколько *Ув* соответствует реальной правильности (проблема реализма уверенности). В экспериментах испытуемый, во-первых, отвечает на основной вопрос задачи и, во-вторых, оценивает свою *Ув* в правильности этого ответа. Сравниваются пропорции правильных и уверенных ответов и выясняется, насколько реалистичны оценки *Ув*.

Эмпирически был установлен следующий ряд соотношений между тремя основными характеристиками процесса решения и его результатов: правильностью принятых решений, степенью *Ув* в их правильности и временем их вынесения.

1. *Ув* бывает выше правильности (сверхуверенность), равна ей (адекватная *Ув*) либо ниже нее (недостаточная *Ув*). Важно отметить, что только адекватная *Ув* лиц, принимающих решения, вызывает доверие партнеров, ведущих совместную деятельность.

2. В сенсорном различении шведские авторы обнаружили только недостаточную *Ув* [25, 32, 37], а канадские – парадоксальный эффект трудности–легкости: сверхуверенность в трудных задачах и недостаточную *Ув* – в легких [22, 24]. Тот же эффект получен и для когнитивных задач на общую осведомленность (см. обзоры [10, 11]). С результатами канадских исследователей согласуются наши данные о сверхуверенности в трудном пороговом различении [12].

3. В трудных задачах на опознавание и при требовании точности ответов *Ув* ошибочных ответов меньше, а время их вынесения больше, чем для верных, тогда как в легких задачах на опознавание и при требовании быстроты ответов соотношение обратное. В целом же для общего массива данных в задачах на различение и опознавание *Ув* ответов обратно пропорциональна времени их вынесения (см. обзор [36]).

4. При требовании точности различения *Ув* формируется в процессе решения, а при требовании быстроты – после него [23].

5. Сверхуверенность при различении по шкале "Одинаковые/Разные" выше, чем по шкале "Больше/Меньше" [12].

Начиная с 90-х гг. XX в. эти экспериментальные исследования вышли на этап разработки концептуально-математических моделей *ПР* и оценки *Ув*. Появление подобных моделей становится закономерным итогом накопления достаточно большого объема эмпирических знаний и свидетельствует о переходе исследований на более высокий уровень. Естественно, что воспроизведение изучаемых явлений средствами математической модели требует дополнительного углубления понимания их структуры и механизмов работы.

II. АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ВЫБОРА С ОЦЕНКОЙ УВЕРЕННОСТИ

За рубежом разработаны математические модели внутренних механизмов *ПР* альтернативного выбора с оценкой *Ув* применительно к когнитивным суждениям, сенсорному различению и жизненным ситуациям. Более и менее развернутые обзоры таких моделей выполнены как зарубежными исследователями [23, 42, 45], так и отечественными авторами [11, 12, 17, 18]. В данной

статье в целях обоснования теоретических предпосылок предлагаемой разработки вначале проясним содержание этих моделей, разбив их на три основных класса и изложив общую характеристику полученных классов. Затем предложим более компактную и вместе с тем дифференцированную их систематизацию по трем разным принципам.

1. Нединамические модели, основанные на психофизической теории обнаружения сигнала [28], являются наиболее простыми: используется единственный отсчет сенсорной репрезентации сигнала новизны (о различии между сравниваемыми признаками), накопленной путем усреднения значений этого сигнала за заданный период времени *T*. Такой отсчет характеризуется тем же средним значением, что и без усреднения, но при этом имеет соответствующим образом уменьшенную дисперсию. Для выбора одной из альтернатив ответа (*есть* сигнал или его *нет*) этот отсчет (сенсорное впечатление) сравнивается с величиной критерия *ПР*. *Ув* в правильности сделанного выбора определяется расстоянием от значения полученного отсчета до значения критерия *ПР*. Версии таких моделей представлены в ряде работ (см., например, [21, 25, 27, 39]). Они не воспроизводят ни динамики субъективной репрезентации сигнала новизны в сенсорном пространстве человека, ни динамики процессов *ПР* и оценки *Ув* на заданном интервале времени *T*.

Недостаток этих моделей (как следствие используемой психофизической теории обнаружения, продолжающей исходную традицию психофизики анализировать лишь конечные показатели сенсорного исполнения – частоты ответов наблюдателя) заключается в том, что они описывают лишь правильность и *Ув*, но не время ответов, т.е. не позволяют получить важную информацию о протекании процесса решения.

2. Динамические модели являются более сложными, так как описывают стохастическую динамику репрезентации сигнала новизны, процессов *ПР* и оценки *Ув* в виде последовательности временных шагов решения длиной Δt. На каждом шаге Δt вычисляются свидетельства в пользу каждой из двух (“больше/меньше”) или трех (“больше/меньше/равно”) альтернатив ответа, которые накапливаются на общем счетчике-накопителе (это варианты модели случайных блужданий [30, 35]) либо на раздельных счетчиках (это аккумуляторная модель, активно развиваемая в последние годы [44–46], и модель выборочных окон [32]). Выбирается та альтернатива, для которой сумма свидетельств первой достигает своего критического значения. *Ув* интерпретируется как функция разности накопленных при этом сумм свидетельств в пользу рассматриваемых альтернатив (в моделях блужданий и аккумуляторной) или как функция отношения этой разности к общей сумме накопленных свидетельств (в модели окон). Например, для обоснования интерпретации *Ув* в аккумуляторной модели ее авторами проводился следующий эксперимент: справа и слева от наблюдателя в случайном порядке предъявлялись короткие частые световые вспышки, а он определял, с какой стороны больше вспышек. *Ув* наблюдателя в выбранном ответе при этом оказалась пропорциональной разности между числом вспышек, полученных с разных сторон. Сенсорные впечатления от вспышек интерпретировались экспериментаторами как свидетельства в пользу альтернатив “справа” и “слева” [47].

Аккумуляторный подход к описанию *ПР* и *Ув* использован также в “соревновательной модели”, разработанной для задачи узнавания, в частности для предъявленных ранее слов, поступивших вперемежку с новыми словами. Модель включает два аккумулятора, на одном из которых в каждой пробе накапливаются свидетельства в пользу гипотезы о предъявлении старого слова, на другом – нового [43].

В модели, разработанной на основе волновой теории сходства и различия [9, 34], использованы представления как психофизической теории обнаружения сигнала, так и стохастического накопления свидетельств. Процесс *ПР* описывается на основе механизма случайных блужданий. *Ув* характеризуется как функция субъективной сенсорной различимости стимулов, критерия решения и длины стохастического пути случайных блужданий.

Динамические модели воспроизводят помимо правильности и *Ув* также время ответа, что позволяет исследовать статистические зависимости между этими тремя переменными.

3. Нейросетевые модели являются еще более сложными, чем модели предыдущего класса, так как они используют аппарат формальных нейронов. Эти модели способны отображать *ПР* не только в задачах по различению одномерных сенсорных признаков, но и в более сложных сенсорно-перцептивных задачах: по узнаванию, предпочтению многомерных стимулов, а также в когнитивных и жизненных задачах. Данный подход к моделированию *ПР* и *Ув* развивается сегодня наиболее интенсивно (в частности, объединяясь с динамическим [33, 41, 46]).

Модель адаптивного фильтра [31] использует стохастическую нейросетевую матрицу синаптических связей между нейронами, описывающую работу механизма памяти, для воспроизведения процесса *ПР* в задаче узнавания сложных перцептивных паттернов. В этой работе подробно анализируются процессы адаптации памяти к повторяющимся сенсорным стимулам и решения зада-

чи узнавания, тогда как *Ув* в принятом решении описывается лишь эскизно.

В развитие аккумуляторной модели *ПР* и оценки *Ув*, упомянутой выше, ее авторами была предложена нейросетевая модель адаптивного обобщенного аккумуляторного процесса [46]. Эта модель, в отличие от исходной [45], разработана для более сложных, чем простое различение, сенсорно-перцептивных задач: для идентификации эталонного стимула среди нескольких (до восьми) альтернативных сравниваемых стимулов. Для каждой альтернативы имеется свой аккумулятор, на котором идет накопление свидетельств в ее пользу. Модель распространяется далее на задачи классификации и идентификации многомерных стимулов.

Для выбора одной из большого набора многопризнаковых альтернатив разработана нейросетевая модель применительно к решению человеком сложных жизненных проблем, (например, при выборе работы) [42]. Эта модель, основанная на рассмотрении процесса *ПР* как элиминировании конкурирующих альтернатив до принятия одной из них [40] и на раннем варианте модели стохастического накопления свидетельств [20], включает в себя нейроны, представляющие сами альтернативы, и нейроны, представляющие учитываемые аспекты данных альтернатив. На каждом шаге процесса решения путем синаптического суммирования сигналов, поступающих от нейронов-аспектов, делается предварительный выбор одного или нескольких возбужденных нейронов-альтернатив. Если одна из альтернатив остается единственно выбранной на заданном, достаточно большом числе шагов, то процесс останавливается, и соответствующая альтернатива выбирается в качестве окончательного ответа. *Ув* в правильности ответа определяется числом колебаний между альтернативами до принятия окончательного решения, что соответствует зафиксированному в человеческом опыте и языке представлению о сомнении как о колебаниях в ходе решения. Неуверенность здесь рассматривается как результат неустойчивых стратегий решения, что согласуется с экспериментальными данными для зрительной пороговой задачи [5].

Данный нейросетевой подход далее был развит применительно к сенсорно-перцептивным задачам с двухальтернативным выбором на материале зрительного различения поворотов геометрической фигуры, а также различения букв [41]. В этом исследовании нейросетевое моделирование объединено с аккумуляторным подходом, как и в работе [46]. При этом исходная аккумуляторная схема [45] модифицирована с учетом механизма забывания. Забывание вызывается тем, что в ходе сравнения свидетельств, накопленных на аккумуляторах, выделенных для каждой альтернативы решения, может происходить частичная "утечка" (забывание) информации.

Модель с забыванием [41] использована также для нейросетевого описания *ПР* в задаче абсолютной идентификации одномерного стимула среди нескольких альтернатив, для каждой из которых имеется свой аккумулятор. Свидетельства в пользу этих альтернатив, формирующиеся на уровне сенсорных репрезентаций стимулов, распределяются далее (на этапе *ПР*) по этим аккумуляторам. Здесь к описанию функционирования аккумуляторов, включающего частичное забывание информации, добавлена шумовая компонента, модифицирующая активацию формальных нейронов сети [33].

Нейросетевые модели позволяют исследовать и правильность, и время решения, и *Ув*. Их преимущество – в развитии прогрессивного "*brain-like*"-подхода к математическому моделированию психических процессов.

Для компактного представления обо всем множестве рассматриваемых моделей, где в более или менее явном виде рассматривается *Ув*, предложим также их классификацию на основе различий между способами математического описания: а) сенсорных образов стимулов; б) протекания процессов *ПР* во времени; в) формирования оценки *Ув* в правильности выбранной альтернативы.

а) По способу описания сенсорных образов стимулов выделены два класса моделей:

***s*-модели** – на входе модели стохастическое описание *сенсорной репрезентации различия* стимулов сразу задается в одномерной сигнальной (*signal*) форме. Это модели, основанные на теории обнаружения сигнала (*Signal Detection Theory Models – SDTM* [21, 25, 27, 39]), модели случайных блужданий (*Random Walk Models – RWM* [9, 30, 34, 35]), аккумуляторная модель (*Accumulator Model – AM* [43–46]) и модель выборочных окон (*Windows Sampling Model – WSM* [32]);

***n*-модели** – вначале строится стохастическое описание многомерных сенсорных репрезентаций стимулов, основанное на применении аппарата формальных нейронов (*neuron*), а затем вычисляется сигнал различия стимулов. Это нейросетевые модели (*NNM*): модель адаптивного фильтра (*Adaptive Filter Model – AFM* [31]), аттракторная нейросетевая модель (*Attractor Neural Network Model – ANNM* [42]), параллельная адаптивная обобщенная аккумуляторная нейросеть (*Parallel Adaptive Generalized Accumulator Network – PAGAN* [46]), соревновательная аккумуляторная модель с забыванием (*Leaky Competing Accumulator Model – LCAM* [41]), модифицированная модель картирования (*Revised Mapping Model – RMM* [33]).

Далее в пунктах б) и в) излагаемой систематизации моделей мы используем только аббревиатуры их названий, введенные в пункте а), и не по-

вторяем ссылки на соответствующие работы, которые уже даны в пункте а).

б) По способу описания процессов *ПР* во времени выделены также два класса моделей:

***i*-модели** – модели без учета динамики *ПР*. Их работа базируется на единственной выборке случайного сенсорного процесса. *ПР* осуществляется путем вычисления отношения правдоподобия для двух рассматриваемых альтернатив ответа и сравнения его с критическим значением (*SDTM*);

***ii*-модели** – динамические модели. *ПР* базируется на временном ряде отсчетов случайного сенсорного процесса, т.е. представляет собой последовательность латентных элементарных шагов решения (*RWM, AM, WSM, NNM*).

в) По способу формирования оценки *Ув* в правильности выбранной альтернативы решения выделены три класса моделей:

***c*1-модели** – для *i*-моделей *ПР*. *Ув* определяется расстоянием между отсчетом сенсорного впечатления о различии стимулов и критерием принятия решения (*SDTM*);

***c*2-модели** – для *ii*-моделей *ПР*. *Ув* определяется по разности накопленных сумм свидетельств (*RWM, AM* и ее варианты: *PAGAN, LCAM, RMM*) или по ее отношению к общей сумме свидетельств (*WSM*) в пользу сравниваемых альтернатив. Несколько иное определение *Ув* предложено в волновом варианте *RWM* с использованием *SDTM*;

***v*-модели** – для *ii*-моделей *ПР*. В процессе решения происходят колебания (*vacilations*) между альтернативами ответа. *Ув* в правильности финального ответа определяется общим числом колебаний между альтернативами (*ANNM*).

К настоящему времени за рубежом наиболее детально проработанной и развернуто характеризующей *ПР* и *Ув* в нем признается *AM*. Она предполагает накопление свидетельств как механизм вынесения решения и оценки *Ув* в его правильности, а также адаптивную подстройку этого механизма с помощью коррекции *Ув* в правильности суждений [44–46]. В силу наибольшей авторитетности этой концепции она используется и в других моделях [33, 41, 43].

Приведенные модели предлагают продуктивные подходы к формальному описанию *ПР* и *Ув* в сенсорном различении, однако они не отражают весь процесс различения достаточно полно. Если собственно сенсорное звено этого процесса развернуто либо бегло характеризуется в большинстве из них, то контролирующая функция *Ув* в правильности вынесенного решения представлена только в *AM* [45]. При этом содержательное наполнение понятий свидетельства и референтного уровня *Ув*, на наш взгляд, раскрыто в *AM* недостаточно. Кроме того, модель объясняет не все упомянутые выше экспериментально наблюдаемые феномены. Не объяснены эффекты сверхуверенности (дано объяснение лишь недостаточной *Ув*) и трудности–легкости. Рассматривается преимущественно задача “больше/меньше” и лишь в малой степени задача “одинаковые/разные”, хотя она наиболее распространена на практике.

Остальные динамические модели описывают преимущественно процессы выбора решения и их временные характеристики, проблеме же моделирования *Ув* не уделяется достаточного внимания. Среди нейросетевых моделей *Ув* конкретно характеризуется лишь в двух [42, 46], однако лишь во второй из них – для сенсорных задач. На восполнение хотя бы части этих пробелов и направлена разработка нашей модели.

III. ОТ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПРОГНОЗА ПРАВИЛЬНОСТИ К УВЕРЕННОСТИ В ПРАВИЛЬНОСТИ ЧЕРЕЗ УЧЕТ РИСКОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТЕЙ

В ходе разработки модели потребовалось прояснить соотношение между *Ув* и вероятностным прогнозом правильности решения. Подходы к пониманию *ПР* с учетом вероятностных характеристик его правильности близки к проблематике наших исследований. Конечно, сама идея вероятностного прогноза имеет важное значение *для понимания принципов* работы внутренних механизмов поведения человека в процессе решения. Вместе с тем, напомним, что в психологических исследованиях принятия решения уже не раз было показано, что для человека нетипично математическое вычисление вероятности достижения цели. Формально безупречные, методологически *рациональные стратегии*, хотя и обладают высокой объяснительной ценностью, зачастую *не отражают реального* процесса принятия решения человеком. Как правило, они требуют такого объема информации, который на самом деле человеку недоступен. Кроме того, их применение часто превышает интеллектуальные возможности человека [38]. Использование, даже упрощенное, правил теории вероятностей затруднительно и часто требует больших умственных усилий, перегружая оперативную память [8]. Поэтому, принимая решения в условиях неопределенности, человек полагается на ограниченное число эвристических принципов, которые сводят сложные задачи оценки и прогноза вероятностей к более простым и интуитивно понятным операциям суждения [14].

Анализ проблемы соотношений между субъективной вероятностью и *Ув* проведен одним из авторов данной статьи [11]. Эти категории развел еще Р. Прайс (1767 г., цит. по [9]). В литературе разграничены два вида *Ув* в суждениях. В когнитивных суждениях она *выведенная (reasoned)* из

знаний субъекта и потому тесно связана с оценками вероятности, а в перцептивных – *непосредственная (direct)*, переживается в самом сенсорном впечатлении [26] и может ассоциироваться с его интенсивностью без вероятностной метрики [29]. В отечественной литературе *Ув* характеризуется как процесс скорее регулятивный (оценочный), детерминированный в значительной степени индивидуально-личностными факторами, что установлено экспериментально [5, 6], в отличие от оценки вероятности как преимущественно когнитивном процессе, определяемом прежде всего входной информацией. В результате проведенного анализа [11] был получен вывод, что вероятностный прогноз правильности решений – это лишь одна: когнитивная функция *Ув* в суждениях как системного психического образования. Она существует наряду с метакогнитивной функцией (рефлексией субъекта: осознанной или неосознанной – о полученной информации, своих знаниях), регулятивной (состоянием, связанным с этими процессами и влияющим на выбор ответа в зависимости от прогноза его правильности) и когнитивно-регулятивной (оценкой правильности решения и на ее основе внутренней обратной связью, позволяющей корректировать данное и последующие решения).

Приведенные материалы определили одну из задач нашей работы: показать, что априорная, чисто вероятностная оценка правильности принимаемых решений, описываемая алгоритмом оптимального обнаружения сигнала, не подходит для описания реального процесса *ПР* человеком. Однако после отказа от вероятностной оценки правильности и введения вместо нее оценки правильности в виде *Ув* модель становится более адекватной поведению человека.

Практическое значение *Ув* в правильности вынесенного суждения как важной составляющей процесса решения нам видится в ее влиянии на то, как человек будет использовать свое суждение при планировании будущего поведения. При достаточно высокой *Ув* человек склонен рассматривать свое суждение как бесспорно достоверное и готов использовать его в полной мере для формирования собственного дальнейшего поведения, обычно никак не оценивая риска, связанного с возможной ошибочностью этого суждения. При низкой же *Ув* все зависит от величины осознаваемого риска. Если риск достаточно мал, то человек обычно не сразу отказывается от такого сомнительного суждения: он старается использовать его хотя бы частично или просто хранит в своей памяти, откладывая на некоторое время его полноценное использование. Если же величина риска высока, то человек обычно отказывается от своего сомнительного суждения и не использует его совсем.

Практический опыт свидетельствует о том, что при решении ответственной задачи человек может переходить от непрерывной оценки *Ув* к упрощенной двухкатегорийной оценке *Ув*: “уверен”, если риск ошибочного решения для него приемлем, и “сомневаюсь”, если риск ошибочного решения для него слишком велик. Очевидно, что *Ув* в принимаемых решениях является для человека важным инструментом самоконтроля доверия к собственным решениям, используемым при планировании своего поведения.

Двухкатегорийная оценка *Ув*: “уверен/сомневаюсь” требует введения критерия ее принятия. Величина этого критерия зависит от рисков потерь, связанных с использованием ошибочных решений. Минимальный уровень суммарных потерь достигается при оптимальном значении критерия.

IV. ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ

В нашей работе моделируется задача сенсорного различения по шкале “Одинаковые/Разные”, которая ранее использовалась в исследовании одного из авторов статьи [12]. В психофизическом эксперименте изучалось зрительное пороговое различение временных интервалов, задаваемых парами последовательных световых сигналов (прямоугольников, вспыхивающих на экране монитора), равных либо едва различающихся по длительности, в случайном порядке (методика Скотниковой, Чурсинова, Костина, Садова – см. [12]). Наблюдатели для каждой пары стимулов давали два ответа: 1) “одинаковые” или “разные” длительности стимулов; 2) “уверен” или “сомневаюсь” в правильности своего первого ответа.

Разработка общей *архитектуры модели* различения сенсорных стимулов ведется на основе классического для отечественной психофизиологии понятия функциональной системы, которое впервые было сформулировано П.К. Анохиным [2], а в дальнейшем развивалось В.Б. Швырковым, Ю.И. Александровым, К.В. Судаковым и рядом других исследователей (см., например, [1]). Несколько упрощая суть дела, в общей операциональной архитектуре функциональной системы П.К. Анохина можно выделить четыре принципиально важные группы психофизиологических процессов, протекающих в любом живом организме:

1. Афферентный синтез. Процессы формирования внутренних репрезентаций воспринимаемых объектов и состояний внешней и внутренней среды, взаимодействующие с доминирующей мо-

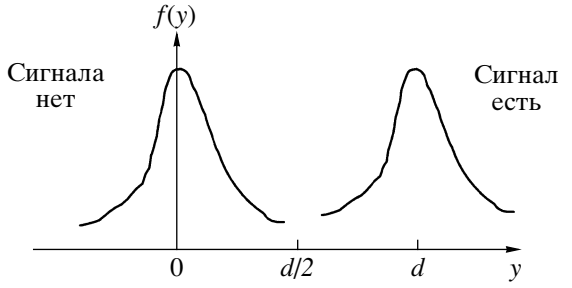

Рис. 1. Нормальные функции плотности вероятности выборки сигнала новизны *y* при одинаковых (слева) и различных (справа) стимулах.

тивацией и целью субъекта, а также процессами извлечения из памяти информации, имеющей отношение к цели субъекта.

2. Принятие решений. Процессы формирования решений, программ будущих действий, априорных оценок параметров промежуточных и конечных результатов запланированных действий (акцептора результатов действий). Функционирование этих процессов происходит на основе принципа опережающего отражения действительности. В соответствии с этим возможность достижения цели предвосхищается на основе предшествующего опыта.

3. Исполнение. Процессы реализации запланированных действий субъекта и формирования *апостериорных* оценок реально достигнутых результатов.

4. Контроль. Сравнение реально полученных (апостериорных) и ожидаемых (априорных) параметров результата. При существенном различии между ними включается обратная связь, реализующая адаптивную подстройку параметров функциональной системы для минимизации (по тому или иному заданному критерию) расхождения между параметрами запланированных и реально достигнутых системой результатов.

Развитие предлагаемой модели отражено в работах [16–18].

Воспроизведение той части процессов афферентного синтеза, которая отвечает за восприятие входной информации, выполняет *сенсорный блок* модели. Для описания процессов представления и запоминания субъективных репрезентаций сравниваемых признаков объектов в сенсорном пространстве человека используется теория Е.Н. Соколова [13] о векторном кодировании этих признаков. В соответствии с ней стимул, воздействующий на ансамбль нейронов, порождает в каждом из них определенный уровень возбуждения. Комбинация этих возбуждений образует вектор возбуждения, характеризующий входное воздействие. В процессе своей работы мозг нормирует этот вектор на единицу, в результате чего разные стимулы создают векторы возбуждения единичной длины, различающиеся только своими направлениями.

Такое описание сенсорной репрезентации стимула разработано на основе использования математического аппарата многомерного шкалирования для обработки результатов большого числа нейрофизиологических и психофизических исследований восприятия таких разных стимулов, как цветовые тона, яркости, ориентации и длины линий и даже эмоциональные выражения человеческого лица. Е.Н. Соколов и др. теоретически описывают также векторное кодирование восприятия временных интервалов (это для нас особенно важно, поскольку в нашем эксперименте [12] изучается именно различение временных интервалов). В целом же он обосновывает *универсальность* предлагаемой им модели векторного кодирования воспринимаемой информации [13]. Векторная психофизиология не рассматривает процесс *ПР* и *Ув* в нем. Тем не менее именно эта математически четко сформулированная теория, применяющая аппарат формальных нейронов, использована в нашей работе для представления сенсорных образов стимулов, поскольку именно в ней наиболее обоснованно воспроизводится процесс возникновения сигнала новизны, необходимый нам для описания *ПР* и оценки *Ув* в задаче сенсорного различения.

В сенсорном блоке выполняются следующие операции: а) Запоминание первого стимула. Он задается вектором возбуждения $\boldsymbol{X}$, имеющим единичную длину. Для запоминания используется формальный нейрон с вектором весовых коэффициентов $\boldsymbol{W}$ также единичной длины. В результате запоминания $\boldsymbol{W}$ становится равным $\boldsymbol{X}$. б) Вычисление сигнала новизны второго (сравниваемого) стимула $\boldsymbol{V}$ осуществляется дополнительным нейроном, сигнал которого дополняет сигнал первого нейрона до единицы. Он имеет вид: $y = 1 - (\boldsymbol{W}, \boldsymbol{V})$. Второй стимул $\boldsymbol{V}$ может совпадать с эталонным $\boldsymbol{X}$: $\boldsymbol{V} = \boldsymbol{X}$, при этом (с учетом, что $\boldsymbol{W} = \boldsymbol{X}$): $y = 1 - (\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}) = 0$, либо отличаться от него: $\boldsymbol{V} \neq \boldsymbol{X}$, при этом: $(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{V}) < 1$ и $y = 1 - (\boldsymbol{X}, \boldsymbol{V}) > 0$. Так как во всех нейронных процессах мозга всегда присутствует случайный шум, то векторы входного возбуждения и весовых коэффициентов нейрона в модели задаются стохастическими векторами с нормально распределенными компонентами. При этом сигнал новизны на выходе дополнительного нейрона формируется как случайный процесс $y(t)$ с функцией плотности вероятности, близкой к нормальному закону. Если стимулы одинаковы, то среднее значение процесса $y(t)$ равно 0, а если стимулы различны, то его среднее значение равно $d > 0$ (рис. 1). Таким образом, функция плотности вероятности процесса $y(t)$ задается всего двумя параметрами – если стимулы одинаковы, то

средним значением 0 и дисперсией σ^2, а если различны, то соответственно d и σ^2.

Отсутствие новизны у второго стимула можно трактовать как присутствие в процессе $y(t)$ только шумовой составляющей $n(t)$ с дисперсией σ^2, а наличие новизны – как появление в процессе $y(t)$ (наряду с шумовой составляющей) сигнала новизны $s(t)$, имеющего постоянную величину $d > 0$. Таким образом, $y(t) = n(t) + s(t)$, $s(t) = 0$ при отсутствии сигнала, $s(t) = d$ при наличии сигнала и исходная задача принятия сенсорного решения сводится к задаче обнаружения сигнала новизны. Данная задача, поставленная в статистической радиотехнике как задача оптимизации процесса обнаружения, уже решена. Очевидно, что ее решение представляет определенный интерес для *понимания* поведения человека, принимающего сенсорные решения и стремящегося выполнить это наилучшим образом.

Моделирование процессов *ПР* в нашей модели выполняет *блок принятия решений*, который описывает внутренние механизмы обнаружения сигнала новизны с оценкой *Ув* в принятом решении. Если заданы следующие параметры: p – априорная вероятность появления сигнала, T – длительность принятия решений, τ_{01} – штраф за пропуск сигнала в тех случаях, когда он реально присутствовал, и τ_{10} – штраф за ложную тревогу при отсутствии сигнала, то для разработки модели, минимизирующей средние потери наблюдателя, можно использовать в качестве прототипа известную теорию оптимального обнаружения сигнала (ТООС) на фоне шума [19, 28].

Согласно этой теории, оптимальный обнаружитель выполняет следующую обработку принятого процесса $y(t)$ с шириной спектра Δf. Вначале из него с шагом Δt берется выборка $(y_1, y_2, \ldots, y_m)$, $T = m\Delta t$. Затем для этой выборки вычисляется отношение правдоподобия $l_m = f_{s,n}(y_1, y_2, \ldots, y_m)/f_n(y_1, y_2, \ldots, y_m)$, где $f_{s,n}(y_1, y_2, \ldots, y_m)$ и $f_n(y_1, y_2, \ldots, y_m)$ – плотности вероятности получения данной выборки $(y_1, y_2, \ldots, y_m)$ при условии наличия сигнала и шума (индекс s, n) и одного только шума (индекс n).

Наконец, полученное значение отношения правдоподобия l_m подается на устройство сравнения с порогом l_0. Если $l_m > l_0$, то принимается решение "сигнал есть", а если $l_m < l_0$ – "сигнала нет". Оптимальная величина порога l_0 зависит только от значений p и τ_{01}, τ_{10} и задается формулой $l_0 = [(1-p)\tau_{10}]/p\tau_{01}$ [19].

Вычисление l_m существенно упрощается, если шаг дискретизации Δt задать примерно равным $1/\Delta f$. При этом отсчеты y_i становятся практически некоррелированными, что при условии нормальности распределения шума позволяет считать их независимыми. В таком случае отношение правдоподобия всей полученной выборки сведется к произведению отношений правдоподобия отдельных отсчетов y_i. Так как для достижения минимума средних потерь при обнаружении сигнала можно использовать не только отношение правдоподобия l_m, но и любую монотонно нарастающую функцию $\chi(l_m)$, то вычисления можно еще более упростить, если использовать $\ln(l_m)$.

Натуральный логарифм отношения правдоподобия для нормально распределенного отсчета y_i легко вычисляется. Если заданы σ^2 и d, то $\ln[f_{s,n}(y_i)/f_n(y_i)] = [y_i^2 - (y_i - d)^2]/2\sigma^2 = d(y_i - d/2)/\sigma^2$, а логарифм отношения правдоподобия для всей выборки соответственно равен сумме

$$L_m = \ln(l_m) = d\sum_{i=1}^{m}(y_i - d/2)/\sigma^2. \qquad (1)$$

Если ввести безразмерный параметр $d' = d/\sigma$, характеризующий потенциальную различимость стимулов, и измерять процесс $y(t)$ в единицах среднего квадратического отклонения шума $y_i' = y_i/\sigma$, то выражение (1) еще более упрощается:

$$L_m = d'\sum_{i=1}^{m}(y_i' - d'/2). \qquad (2)$$

Таким образом, вместо сравнения отношения правдоподобия l_m с порогом l_0 можно сравнивать сумму L_m с модифицированным порогом

$$L_0 = \ln(l_0) = \ln[(1-p)\tau_{10}] - \ln(p\tau_{01}). \qquad (3)$$

Вычисленное по такому простому алгоритму значение L_m сравнивается с L_0, и затем принимается окончательное решение. Полученная в ТООС решающая функция имеет вид:

$$A_{\text{опт}}(y_1, y_2, \ldots, y_m) = 1, \text{ если } L_m(y_1, y_2, \ldots, y_m) \geq L_0, \qquad (4)$$
$$0, \text{ если } L_m(y_1, y_2, \ldots, y_m) < L_0.$$

Она равна 1, если оптимальный обнаружитель принимает решение "сигнал есть", и обращается в 0, если он принимает решение "сигнала нет".

Условные вероятности правильного обнаружения D и ложной тревоги F в ТООС оцениваются с помощью формул:

$$D = \int A_{\text{опт}}(y_1, y_2, \ldots, y_m) \times \times f_{s,n}(y_1, y_2, \ldots, y_m)dy_1dy_2\ldots dy_m, \qquad (5)$$

$$F = \int A_{\text{опт}}(y_1, y_2, \ldots, y_m) \times \times f_n(y_1, y_2, \ldots, y_m)dy_1dy_2\ldots dy_m. \qquad (6)$$

Вероятность вынесения оптимальным обнаружителем ответа "сигнал есть" равна $P_1 = pD + (1-p)F$, а вероятность вынесения ответа "сигнала нет" равна $P_0 = (1-p)(1-F) + p(1-D)$. При этом вероятность правильности полученного от-

вета “сигнал есть” равна $P_1^1 = pD$, а вероятность ошибочности этого ответа равна $P_1^0 = (1-p)F$. Вероятность правильности полученного ответа “сигнала нет” равна $P_0^1 = (1-p)(1-F)$, а вероятность ошибочности этого ответа равна $P_0^0 = p(1-D)$.

Проведем теперь анализ полученных результатов с точки зрения их использования для моделирования *ПР* и оценки *Ув* человеком в сенсорных задачах. Порог (3) решающей функции (4) не зависит от длительности принятия решений $T = m\Delta t$. Поэтому структура модели, разработанной на основе ТООС, достаточно проста в реализации. Достоинством этой модели также является то, что алгоритм вычисления решающей функции (4) вполне соответствует реальным возможностям человека. Алгоритмы такого типа используются в зарубежных моделях *ПР* в сенсорных задачах, описываемых в обзорах [23, 42]. Однако данная модель обладает также существенными недостатками.

Вероятностный прогноз правильности решений, полученных в соответствии с ТООС, не может использоваться для моделирования поведения человека, поскольку для него, как было отмечено в предыдущем разделе, нетипично вычисление вероятностей. Кроме того, оптимальное значение порога L_0 (критерия *ПР*) не может быть введено в модель просто в виде заданного числа. Критерий L_0 должен вводиться в модель *ПР* путем обучения на конкретных примерах – так, как это происходит в реальности.

Выход из данной ситуации был найден нами путем совместного использования математически строгих и достаточно простых формул (2), (3), полученных в парадигме ТООС, известного предложения измерять *Ув* как расстояние от сенсорного впечатления до его порогового значения, задаваемого критерием *ПР* [21, 25, 27], и адаптивной подстройки механизма *ПР* и оценки *Ув* с помощью схемы обратной связи, предложенной в аккумуляторной модели [45].

Наши предложения по развитию модели можно кратко сформулировать в виде следующих ***гипотез***:

1. Принятие решения в двухальтернативной сенсорной задаче в соответствии с парадигмами ТООС и “баланса свидетельств” Д. Викерса может быть представлено как *динамический процесс*, состоящий из последовательности *латентных* шагов длительностью Δt. На каждом шаге происходит получение *латентного свидетельства* $d'(y_i' - d'/2)$ в пользу только одной из двух альтернатив ответа. На такое латентное свидетельство не может быть оказано влияние в целях его изменения (например, с помощью штрафов за ошибки). Латентные свидетельства отличаются как количественно (могут быть больше или меньше по величине), так и качественно (свидетельства в пользу разных альтернатив имеют разные знаки). После сравнения суммы накопленных латентных свидетельств $L_m = d'\Sigma(y_i' - d'/2)$ с критерием L_0 процесс решения заканчивается осознаваемым и *эксплицитным выбором* ответа, принимающего только два значения: “одинаковые” или “разные”.

2. Под *латентным свидетельством* $d'(y_i' - d'/2)$ в пользу рассматриваемых альтернатив можно понимать *неосознаваемое* человеком значение *Ув в латентном решении,* принимаемом на интервале времени Δt. Значение *Ув* в латентном решении формируется, в отличие от [25, 26], как *произведение* различимости стимулов d' на отклонение отсчета сигнала новизны y_i' от величины $d'/2$, которая играет при этом роль критерия принятия латентного решения.

3. На основе *неосознаваемой Ув*, значение которой равно отклонению величины L_m от L_0, прогнозируется правильность принятого решения в виде *осознаваемой Ув*, имеющей в нашей модели только два дискретных значения: “уверен” или “сомневаюсь”. При этом получение осознаваемой *Ув* можно рассматривать как вторичное решение. Первое решение (“одинаковые/разные”) прогнозирует осознаваемое соотношение между предъявленными стимулами на основе суммы неосознаваемых свидетельств $L_m = d'\Sigma(y_i' - d'/2)$. Второе же осознаваемое решение (“уверен/сомневаюсь”) испытуемый выносит относительно правильности первого решения. Для получения осознаваемой оценки *Ув*: “уверен/сомневаюсь” требуется критерий ее выбора. Величина этого критерия зависит от рисков потерь, обусловленных использованием ошибочных решений и неиспользованием правильных решений.

4. Осознаваемая *Ув* в правильности принятого решения выполняет функцию самоконтроля, указывающего человеку, использовать ли данное решение эксплицитно или сохранять его латентным. То есть *Ув* выступает в качестве внутренней обратной связи, регулирующей поведение человека.

5. Для адаптивного управления процессами *ПР* и оценки *Ув* человек может использовать известный эффект внешней обратной связи. Применительно к нашей модели это означает, что штраф за ошибочное решение (“одинаковые/разные”) побуждает его сдвигать критерий *ПР* в сторону уменьшения вероятности вынесения подобного ошибочного решения в будущем. Так как штрафы за ошибочные решения: “одинаковые” (при пропуске сигнала новизны) и “разные” (при лож-

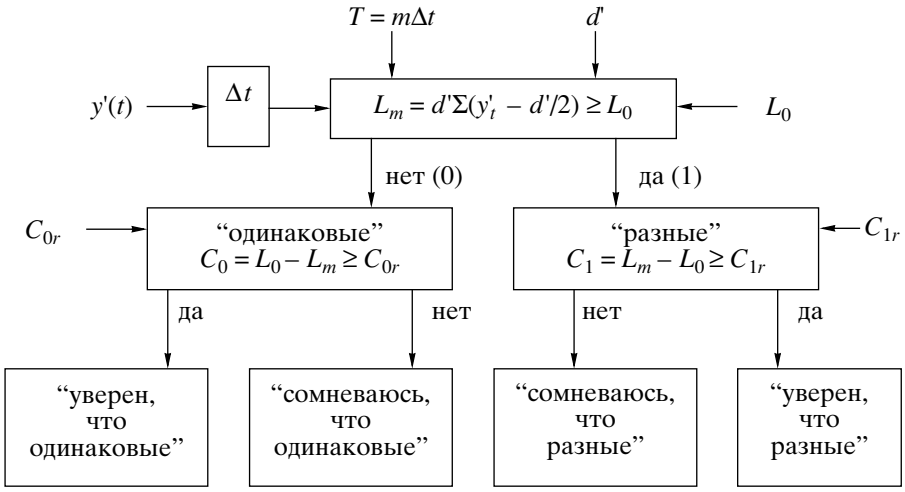

Рис. 2. Принципиальная схема блока принятия решений.

ном обнаружении сигнала новизны), побуждают наблюдателя смещать критерий в противоположные стороны, то в итоге критерий *ПР* адаптируется к изменениям величин штрафов и частоты предъявления сигнала новизны, обеспечивая приемлемую близость средних потерь к их минимально возможному уровню. Аналогично для ответов "одинаковые" и "разные" с помощью штрафов за использование ошибочного решения и за неиспользование правильного решения может быть обеспечена адаптивная подстройка соответствующих критериев получения осознаваемых оценок *Ув*. При этом критерии получения осознаваемых оценок *Ув* вполне соответствуют понятию референтного уровня *Ув*, введенному Д. Викерсом [45].

V. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ БЛОКОВ МОДЕЛИ

В соответствии с теорией П.К. Анохина наша модель состоит из четырех взаимосвязанных блоков, функционирование которых циклично во времени. Так как подобная модель разрабатывается впервые и ее главной целью является демонстрация принципиальной возможности применения понятия функциональной системы при моделировании сенсорных задач, то математическое описание основных блоков системы применительно к нашей задаче было выбрано максимально простым, но сохраняющим специфику исследуемой задачи.

Сенсорный блок описывает внутренние механизмы приема и переработки входной информации о сравниваемых признаках стимулов и формирования их субъективных сенсорных репрезентаций. С его выхода снимаются отсчеты нормального случайного сигнала новизны y'_i с единичной дисперсией. Среднее значение отсчетов y'_i для различных предъявлений пар сравниваемых стимулов варьируется по случайному закону. С вероятностью p оно принимает значение d', а с вероятностью $(1 - p)$ равно 0.

Блок принятия решений описывает внутренние механизмы *ПР* о различии или равенстве стимулов с оценкой *Ув* в принятом решении.

Процесс *ПР* организован во времени следующим образом. Периодически с шагом времени Δt (характеризующим элементарные микроинтервалы решения задачи человеком) отсчеты сигнала новизны y'_i сравниваются с заданной величиной $d'/2$ и осуществляется латентное (т.е. не выражающееся в каком-либо внешнем действии) накопление суммы свидетельств L_m. В момент времени $T = m\Delta t$ испытуемый принимает эксплицитное решение согласно решающей функции (4). Если решающая функция равна 1, то принимается решение "сигнал новизны есть" (у нас – "разные") и замеряется латентная *Ув* в его правильности, под которой понимается положительное отклонение $C_1 = L_m - L_0$. Соответственно если решающая функция равна 0, то принимается решение "сигнала новизны нет" (у нас – "одинаковые") и замеряется положительное отклонение $C_0 = L_0 - L_m$, являющееся латентной *Ув* в его правильности.

Затем значения латентной *Ув* C_1 или C_0 сравниваются с соответствующими критериями C_{1r} или C_{0r}. Если значение *Ув* превышает свой референтный уровень, то выносится решение "уверен", если же референтный уровень не превышен – "сомневаюсь". C_{1r} и C_{0r} по аналогии с критерием принятия решения об уверенности, введенным в аккумуляторной модели [45], мы назвали референтными уровнями уверенности. Принципиаль-

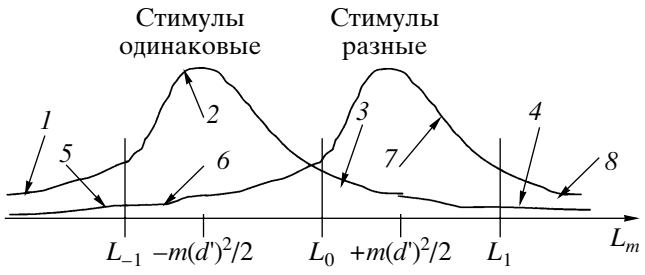

Рис. 3. Функции плотности вероятности логарифма отношения правдоподобия выборки сигнала новизны (y_1, y_2, …, y_m) при одинаковых (слева) и различных (справа) стимулах.

ная схема блока принятия решений приведена на рис. 2.

Таким образом, в самом общем случае блок принятия решений имеет четыре канала – два для формирования уверенных ответов: “разные” или “одинаковые” сравниваемые стимулы, и два для формирования соответствующих неуверенных ответов. Величины критериев L_0, C_{0r} и C_{1r} принятия указанных решений наряду с величинами времени принятия решения $T = m\Delta t$ и различимости стимулов d' поступают в этот блок извне. При этом значения критериев L_0, C_{0r} и C_{1r} поступают из описанного ниже блока обратной связи, не показанного на рис. 2. А величины различимости стимулов d' и времени принятия решения T задаются.

Нормальная функция плотности вероятности случайной величины L_m может занимать в зависимости от реального присутствия или отсутствия сигнала новизны (см. рис. 3) два различных положения. При одинаковых стимулах распределение смещено влево и среднее значение нормальной величины L_m равно $-m(d')^2/2$, а при разных стимулах распределение смещено вправо и среднее значение нормальной величины L_m равно $+m(d')^2/2$. Дисперсия в обоих случаях равна $m(d')^2$.

В зависимости от реального присутствия или отсутствия сигнала новизны и от положения полученной при моделировании величины L_m относительно трех критических значений: $L_{-1} = L_0 - C_{0r}$, L_0, $L_1 = L_0 + C_{1r}$, на выходе блока принятия решений может быть восемь разных исходов различения предъявленной пары стимулов, которые приведены в таблице. Во второй ее строке находятся четыре исхода, соответствующие ситуации, когда стимулы одинаковые. В третьей строке таблицы находятся четыре исхода, соответствующие ситуации, когда стимулы разные. На рис. 3 стрелками показаны участки функций плотности вероятности, соответствующие номерам исходов.

Блок исполнения в нашей модели является идеальным. То есть для простоты моделирования считается, что наблюдатель при исполнении запланированного решения не ошибается: всегда нажимает именно ту кнопку на клавиатуре компьютера, которую решил нажать.

Блок обратной связи осуществляет подстройку критериев L_0, L_{-1} и L_1 по однотипной для каждого критерия схеме отрицательной обратной связи. Рассмотрим работу этой схемы на примере подстройки критерия L_0.

Предполагается, что после вынесения обоих требуемых ответов наблюдатель получает от экспериментатора оценку правильности своих решений. Если он принял решение “одинаковые”, когда на самом деле стимулы были разные, то экспериментатор штрафует его за пропуск сигнала новизны. Величина штрафа τ_{01} является для наблюдателя сигналом ошибки. Критерий L_0 механизма *ПР* при этом в соответствии с гипотезой 5 раздела IV уменьшается на величину $\alpha_{01}\ \tau_{01}$ для того, чтобы вероятность повторного вынесения подобного ошибочного решения в будущем стала меньше. Величина α_{01} – индивидуальная восприимчивость наблюдателя к штрафам за пропуск сигнала новизны. Если же наблюдатель принял решение “разные”, когда на самом деле стимулы были одинаковые, то экспериментатор штрафует его за ошибочное обнаружение сигнала новизны τ_{10}. Величина критерия L_0 при этом увеличивается на величину $\alpha_{10}\ \tau_{10}$, где α_{10} – индивидуальная восприимчивость наблюдателя к штрафам за ложную тревогу. Значения индивидуальной восприимчивости наблюдателя к штрафам за пропуск сигнала и за ложную тревогу могут не совпадать. Важно отметить, что именно эта коррекция критерия L_0, а не просто объявленное решение наблюдателя является, по Анохину, конечным этапом действия механизма решения сенсорной задачи.

Возможные исходы различения предъявленной пары стимулов на выходе блока принятия решений

Положение L_m на оси логарифма отношения правдоподобия	$L_m \le L_{-1}$	$L_{-1} < L_m \le L_0$	$L_0 < L_m \le L_1$	$L_1 < L_m$
Стимулы одинаковые	1. Уверенное правильное решение “одинаковые”	2. Неуверенное правильное решение “одинаковые”	3. Неуверенное ошибочное решение “разные”	4. Уверенное ошибочное решение “разные”
Стимулы разные	5. Уверенное ошибочное решение “одинаковые”	6. Неуверенное ошибочное решение “одинаковые”	7. Неуверенное правильное решение “разные”	8. Уверенное правильное решение “разные”

Коррекция критериев L_{-1} и L_1 происходит аналогично, за исключением того, что экспериментатор штрафует наблюдателя за уверенность в ошибочном решении и сомнение в правильном решении.

Вначале опишем процесс подстройки критерия L_{-1}. Величина штрафа за уверенность в ошибочном решении "одинаковые" задается переменной τ_{101}, а соответствующая индивидуальная восприимчивость задается переменной α_{101}. Штраф за сомнение в правильном решении "одинаковые" задается переменной τ_{000}, а соответствующая индивидуальная восприимчивость задается переменной α_{000}.

Затем опишем процесс подстройки критерия L_1. Величина штрафа за уверенность в ошибочном решении "разные" задается переменной τ_{110}, а соответствующая индивидуальная восприимчивость задается переменной α_{110}. Штраф за сомнение в правильном решении "разные" задается переменной τ_{011}, а соответствующая индивидуальная восприимчивость задается переменной α_{011}.

Отметим, что за рубежом при моделировании *ПР* с оценкой *Ув* в сенсорном различении не используются понятие функциональной системы и векторное описание сенсорных репрезентаций. В отечественных же математических моделях функциональных систем [7, 15] и векторных описаниях сенсорных репрезентаций [3, 13] эти подходы не используются для анализа *ПР* и *Ув* в сенсорных задачах. Поэтому аналогов нашей модели в настоящее время нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уверенность как способ контроля правильности принимаемых решений представляется нам универсальным инструментом для принятия любых решений. В силу этого данная работа имеет прикладное значение для создания технических устройств, обладающих элементами встроенного искусственного интеллекта, который может быть использован для их адаптивного функционирования в практических задачах.

Уточненное нами в работе понятие референтного уровня *Ув* и введенное понятие индивидуальных восприимчивостей требуют дальнейшего специального анализа. По Викерсу, референтный уровень *Ув* – это осознанная установка на ответ, всецело определяемая внешне заданными факторами: инструкциями, штрафами за недостаточную либо чрезмерную *Ув*, т.е. прямой аналог критерия *ПР* в теории обнаружения сигнала. Однако в ряде исследований выявлены взаимосвязи между индивидуальными особенностями человека и степенью его *Ув* в себе и в своих решениях (см. об этом в работах [11, 12]). Эти материалы указывают на недостаточность рассмотрения референтного ("желаемого") уровня *Ув* в решении (как и любого поведения человека) только как детерминированного извне. На наш взгляд, также вероятны зависимости референтного уровня *Ув* в решении от *Ув* в себе, свойств индивидуальности наблюдателя (например, индивидуальных восприимчивостей к штрафам за ошибки), а также от того, как он воспринял инструкции, систему штрафов и т.п. Выяснение внутренних психологических детерминант референтного уровня *Ув* и индивидуальных восприимчивостей к штрафам, а также их соотношения с внешне заданными факторами – актуальная перспектива развития модели *ПР* и *Ув* в их правильности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александров Ю.И.* Теория функциональных систем и системная психофизиология // Системные аспекты психической деятельности / Под ред. К.В. Судакова. М.: Эдиториал УРСС, 1999. С. 96–152.
2. *Анохин П.К.* Философские аспекты теории функциональных систем. М.: Наука, 1978.
3. *Забродин Ю.М., Лебедев А.Н.* Психофизиология и психофизика. М.: Наука, 1977.
4. *Забродин Ю.М., Фришман Е.З., Шляхтин Г.С.* Особенности решения сенсорных задач человеком. М.: Наука, 1981.
5. *Вайнер И.В.* Субъективная уверенность при решении психофизической задачи: Дис. … канд. психол. наук. М.: ИП АН СССР, 1990.
6. *Высоцкий В.В.* Личностные и процессуальные условия формирования уверенности в правильности решения задачи: Дис. … канд. психол. наук. М.: ИП РАН, 2001.
7. *Демин А.В., Витяев Е.Е.* Модель логического анимата с автоматическим формированием подцелей // Нейроинформатика-2007. Всероссийская научно-техническая конференция: Сборник научных трудов. Ч. 3. М.: МИФИ, 2007. С. 85–92.
8. *Козелецкий Ю.* Психологическая теория решений. М.: Прогресс, 1979.
9. *Линк С.* Волновая теория сходства и различия. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1995.
10. *Лихтенштейн С., Фишхофф Б., Филлипс Л.Д.* Калибровка вероятностей: положение дел к 1980 г. // Принятие решений в неопределенности: Правила и предубеждения / Под ред. Д. Канемана, П. Словик, А. Тверски. Харьков: Гуманитарный центр, 2005. С. 351–382.
11. *Скотникова И.Г.* Проблема уверенности: история и современное состояние // Психол. журн. 2002. Т. 23. № 1. С. 52–60.
12. *Скотникова И.Г.* Экспериментальное исследование уверенности в решении сенсорных задач // Психол. журн. 2005. Т. 26. № 3. С. 84–99.
13. *Соколов Е.Н.* Восприятие и условный рефлекс: новый взгляд. М.: УМК "Психология"; Московский психолого-социальный институт, 2003.

14. *Тверски А., Канеман Д.* Принятие решений в условиях неопределенности: правила и предубеждения // Принятие решений в неопределенности: Правила и предубеждения / Под ред. Д. Канемана, П. Словик, А. Тверски. Харьков: Гуманитарный центр, 2005. С. 17–36.

15. *Умрюхин Е.А.* Моделирование и объективная оценка системных механизмов психической деятельности // Системные аспекты психической деятельности / Под ред. К.В. Судакова. М.: Эдиториал УРСС, 1999. С. 177–262.

16. *Шендяпин В.М.* Сенсорное различение: математическое моделирование // Психофизика сегодня. М.: Изд-во ИП РАН, 2007. С. 123–135.

17. *Шендяпин В.М., Скотникова И.Г.* Разработка модели принятия решения в когнитивных задачах // Труды Международных научно-технических конференций IEEE AIS'03 и CAD-2003. М.: Физматлит, 2003. Т. 1. С. 449–453.

18. *Шендяпин В.М., Скотникова И.Г.* Математическое моделирование принятия решения и уверенности при выполнении сенсорных задач // Новости искусственного интеллекта. 2006. № 2. С. 5–13.

19. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981.

20. *Audley R.J.* A stochastic model for individual choice behavior // Psychological Review. 1960. V. 67. № 1. P. 1–15.

21. *Balakrishnan J.D., Ratcliff R.* Testing models of decision making using confidence ratings in classification // Journ. of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. 1996. V. 22. P. 615–633.

22. *Baranski J.V., Petrusic W.M.* The calibration and resolution of confidence in perceptual judgments // Perception and Psychophysics. 1994. V. 55. P. 412–428.

23. *Baranski J.V., Petrusic W.M.* Probing the locus of confidence judgments: experiments on the time to determine confidence // Journ. of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. 1998. V. 24. P. 929–945.

24. *Baranski J.V., Petrusic W.M.* Realism of confidence in sensory discrimination // Perception and Psychophysics. 1999. V. 61. P. 1369–1383.

25. *Bjorkman M., Juslin P., Winman A.* Realism of confidence in sensory discrimination: the underconfidence phenomenon // Perception and Psychophysics. 1993. V. 54. P. 75–81.

26. *Bjorkman M.* Internal cue theory: calibration and resolution of confidence in general knowledge // Organizational Behaviour and Human Decision Processes. 1994. V. 58. P. 368–405.

27. *Ferrel W.R.* A model for realism of confidence judgments: implications of underconfidence in sensory discrimination // Perception and Psychophysics. 1995. V. 57. P. 246–254.

28. *Green D.M., Swets J.A.* Signal Detection Theory and Psychophysics. N.Y.: Wiley. 1st ed., 1966; 2nd ed., 1974.

29. *Gregson R.A.M.* Confidence judgments for discrimination in nonlinear psychophysics // Nonlinear Dynamics, Psychology and Life Sciences. 1999. V. 3. P. 31–48.

30. *Heath R.A.* Random-walk and accumulator models of psychophysical discrimination: a critical evaluation // Perception. 1984. V. 13. P. 57–65.

31. *Heath R.A., Fulham R.* An adaptive filter model for recognition memory // British Journ. of Mathematical and Statistical Psychology. 1988. V. 1. P. 119–144.

32. *Juslin P., Ollson H.* Thurstonian and Brunswikian origins of uncertainty in judgment: a sampling model of confidence in sensory discrimination // Psychological Review. 1997. V. 104. P. 344–366.

33. *Lacouture I., Marley A.A.J.* Non-linear decision process in absolute identification // Fechner Day'2000: Proceedings of the 10th Annual Meeting of the International Society for Psychophysics. (ISP) / Ed. by C. Bonnet. Strasbourg: France, 2000. P. 91–96.

34. *Link S.W.* C.S. Pierce, confidence and random walk theory // Fechner Day'2003: Proceedings of the 13th Annual Meeting of the International Society for Psychophysics. (ISP) / Eds. B. Berglund, E. Borg. Larnaka: Cyprus, 2003. P. 151–156.

35. *Link S.W., Heath R.A.* A sequential theory of psychological discrimination // Psychometrika. 1975. V. 40. P. 77–105.

36. *Luce R.D.* Response Times. Their Role in Inferring Elementary Mental Organization. N.Y.: Oxford University Press, Clarendon Press. Oxford, 1986.

37. *Olsson H., Winman A.* Underconfidence in sensory discrimination: the interaction between experimental setting and response strategies // Perception and Psychophysics. 1996. V. 58. P. 374–382.

38. *Payne J.W., Braunstein M.L.* Preferences among gambles with equal underlying distribution // Journ. of Experimental Psychology. 1971. V. 87. P. 13–18.

39. *Treisman M., Faulkner A.* The setting and maintenance of criteria representing levels of confidence // Journ. of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. 1984. V. 10. P. 119–139.

40. *Tversky A.* Elimination by aspects // Psychological Review. 1972. V. 79. P. 281–299.

41. *Usher M., McClelland J.L.* The time course of perceptual choice: the leaky, competing accumulator model // Psychological Review. 2001. V. 108. № 3. P. 550–592.

42. *Usher M., Zakay D.* A neural network model for attribute-based decision processes // Cognitive Science. 1993. V. 17. P. 349–396.

43. *Van Zandt T., Maldonado-Molina M.* A mechanism for two-choice discrimination: time dependent response reversals in recognition memory // Fechner Day'2000: Proceedings of the 10th Annual Meeting of the International Society for Psychophysics. (ISP) / Ed. by C. Bonnet. Strasbourg: France, 2000. P. 109–114.

44. *Vickers D.* Confidence and response time in three-category judgment // Fechner Day'2003: Proceedings of the 13th Annual Meeting of the International Society for Psychophysics. (ISP) / Eds. B. Berglund, E. Borg. Larnaka: Cyprus, 2003. P. 325–331.

45. *Vickers D., Lee M.* Dynamic models of simple judgments: I. Properties of a self-regulating accumulator model // Nonlinear dynamics, psychology and life sciences. 1998. V. 2. P. 169–194.
46. *Vickers D., Lee M.* Dynamic models of simple judgments: II. Properties of a self-organizing PAGAN (Parallel, Adaptive, Generalized Accumulator Network) Model for Multi-Choice Tasks // Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences. 2000. V. 4. № 1. P. 1–31.
47. *Vickers D., Pietsch A.* Decision making and memory: predicting accuracy, response time and confidence on individual trials // Fechner Day'2000: Proceedings of the 10th Annual Meeting of the International Society for Psychophysics. (ISP) / Ed. by C. Bonnet. Strasbourg: France, 2000. P. 115–120.

MATHEMATICAL MODELING OF CONFIDENCE IN DECISION MAKING IN SENSORY TASKS

V. M. Shendyapin*, I. G. Skotnikova, V. A. Barabanshchikov***, V. B. Tarasov******

** Programmer, experimental psychology center, MCPPU, Moscow*

*** PhD, senior research assistant of systematic research of mental phenomena laboratory, IP RAS, Moscow*

**** Corresponding Member of RAE, Sc.D. (psychology), professor, head of systematic research of mental phenomena laboratory, IP RAS, Moscow*

***** PhD, assistant professor, deputy head of the "Computer-based automation systems" Department, MSTU after N.E. Bauman, Moscow*

A mathematical model of decision making in sensory judgments accompanied by feeling of confidence in its correctness is developed. Confidence serves as an internal control of decisions made. The control is based on instructions, payoffs and a subject's experience of previous decisions which define a referent level of confidence.

Kew words: mathematical modeling, decision making, confidence, sensory discrimination.