

**МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

***СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ***

**С.И.Карась**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МЕДИЦИНЕ**

Рекомендуется Учебно-методическим объединением по медицинскому и фармацевтическому образованию вузов России в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по специальностям медико-биологических факультетов

**Томск 2003**

С.И.Карась. Информационные основы принятия решений в медицине.

Томск: СГМУ, 2003, 205 с.

Данное учебное пособие является попыткой адаптации и применения в медицине некоторых подходов к принятию решений, разработанных в разных областях знаний. В основе издания лежит курс лекций, читаемый автором студентам Сибирского государственного медицинского университета. Пособие предназначено для студентов медико-биологических факультетов, рекомендуется студентам других специальностей, врачам, научным сотрудникам для доказательного подхода к процессу принятия решений в медицине, обработке данных и знаний.

Разработано на кафедре медицинской и биологической кибернетики Сибирского государственного медицинского университета.

Редактор:

Зав. кафедрой медицинской и  
биологической кибернетики СГМУ, профессор  
Я.С.Пеккер

Рецензенты:

Зам. директора Института физиологии СО РАМН, профессор

Л.И.Афтанас

Зам. директора НИИ кардиологии ТНЦ РАМН, профессор Ю.Б.Лишманов

© Сибирский государственный медицинский университет, 2002

## Введение

В основе данного пособия лежит курс лекций по клинической кибернетике, читаемый автором студентам медико-биологического факультета Сибирского государственного медицинского университета. Целью данного курса является увеличение степени доказательности медицинских решений. Термин "доказательная медицина" (evidence-based medicine) означает медицинскую практику, основанную на правильно обработанной, проверенной и осмысленной информации, на данных, полученных в правильно организованных клинических исследованиях. Курс лекций включает сведения о способах принятия обоснованных клинических решений, способах обработки клинических и лабораторных данных, извлечения, представления и использования медицинских знаний.

Область применения клинической кибернетики в медицинской практике довольно широка. Информационно-справочное обеспечение медицины, создание компьютерных историй болезни, оптимизация статистической отчетности лишь частично связаны с рассматриваемыми в данном пособии вопросами. Такой аспект, как разработка и эксплуатация аппаратуры с программным управлением и программно-аппаратных комплексов, не входит в пособие вовсе. Зато разработка и реализация алгоритмов принятия решений и интеллектуальных компьютерных систем (обучающих, диагностических) прямо связаны с изложенным материалом.

Принятие решений в медицине – исключительно ответственный процесс, от оптимальности которого зависит, как минимум, экономия медицинских ресурсов, а как максимум – жизнь больного и судьба врача. Принимая решения, можно

полагаться на индивидуальные знания, врачебную интуицию, клиническое мышление, советы коллег, но можно наряду с этим попробовать использовать разработанные в других науках подходы, адаптировать или просто применить их к медицинским задачам. Несмотря на все их разнообразие, подходы к принятию решений можно разделить на два основных типа – алгоритмический и эвристический.

Учебное пособие состоит из трех разделов. В первом рассматриваются общие проблемы принятия решений. Второй раздел содержит информацию о характеристиках данных в медицине, сведения об алгоритмах, используемых для поддержки решений в медицине, о методах оценки эффективности диагностических тестов, сравнении их характеристик и использовании цен разных типов результатов. В третьем разделе описывается эвристический подход к принятию клиничко-диагностических решений, способов извлечения, представления и анализа медицинских знаний.

## **1. ПРОБЛЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

Принятие решения (или выбор) – это выделение и реализация одной альтернативы либо их группы из некоторого исходного множества альтернатив. Выбор – операция, обязательно входящая в любой целенаправленный процесс. Способность сделать правильный выбор – свидетельство квалификации специалиста, одно из качеств эксперта. Поэтому и в обучении медицинской диагностике, и в диагностическом процессе естественно стремление найти алгоритм правильного выбора. Формализация принятия решения возможна в хорошо структурированных задачах, когда существуют способы сравнения альтернатив и выбора более предпочтительных. Предварительно должны быть сформированы множество

имеющихся альтернатив и цели, ради которых производится выбор.

Однако в слабо структурированных областях знаний разработать алгоритмы принятия решений довольно трудно, в основном это алгоритмы перебора, методы проб и ошибок. Значительная доля предметных областей медицины слабо структурированы и плохо формализованы, поэтому в них большое значение имеют не диагностические алгоритмы, а эвристические, почерпнутые из опыта работы, приемы экспертов.

### **1.1. Компоненты решений**

Проблема выбора не тривиальна, особенно в медицине. Каждая компонента процесса принятия решения может реализоваться в различных вариантах:

- Множество альтернатив может быть дискретным или непрерывным.
- Режим выбора может быть разовым или повторяющимся (итеративным).
- Оценка альтернатив может производиться по разному количеству критериев разного типа. Например, выбор показателя эффективности врачебных решений – очень важный и сложный вопрос. При оценке эффективности лечения показателями можно считать исчезновение симптомов, отсутствие побочных эффектов, сохранение качества жизни, влияние на сопутствующие заболевания, удовлетворенность больного. При определении эффективности работы учреждений здравоохранения критерии могут быть совсем иными.
- Ответственность за принятое решение может быть односторонней или многосторонней. В последнем случае

имеет значение степень согласованности целей ответственных лиц – от полного совпадения (кооперативный выбор) до полной противоположности (выбор в ситуации конфликта).

- Последствия каждой альтернативы выбора могут быть: известны (условия определенности); неизвестны точно, но вероятность каждого из возможных последствий можно оценить (условия статистической неопределенности); неизвестны, и вероятность каждого из возможных последствий оценить нельзя (условия неопределенности).

Диагностику и лечение больных можно рассматривать как последовательное принятие ряда решений: информационных (обследование, диагностика), организационных (выработка стратегии, плана лечения, подготовка ресурсов), оперативных (назначение препарата, подготовка к операции). До принятия действительно обоснованного решения в любой области знаний проводится концептуальное моделирование проблемной ситуации. Для создания концептуальной модели в медицине используется ряд информационных компонент:

- информация о состоянии больного, включая сбор разнообразных данных и сам процесс диагностики,
- информация о вариантах решения задачи, о множестве альтернатив, которыми располагают лица, принимающее решение – фактически это квалификация, эрудиция врача,
- информация о состоянии окружающей среды, о дополнительных факторах, влияющих на состояние пациента, об условиях реализации полноценного лечения,
- информация о наличии и состоянии медицинских ресурсов.

Вместо конкретной информации в модели обычно используются типы данных и знаний, которые можно выделить только при абстрагировании. Моделирование всегда означает абстрагирование, отвлечение от несущественных моментов, которые в дальнейшем не рассматриваются. При этом создается целесообразно упрощенный, идеализированный оригинал. Такой подход особенно полезен при исследовании сложных объектов, а в медицине простых объектов очень мало. Для этого применяются, в основном, два вида абстракции:

- **Обобщение** – это выделение сходства объектов и отказ от учета их различий. Множество конкретных информационных элементов соотносятся с одним общим типом, при этом обобщенный тип (болезнь) обладает свойствами, общими для базовых экземпляров (травма, ОРВИ, врожденная патология).
- **Агрегация** – это конструирование нового объекта путем объединения существовавших ранее объектов. Агрегация может применяться как для конкретных значений данных, так и для типов данных и знаний. Например, тип Анамнез может быть сконструирован из типов Протекание беременности и родов, Особенности развития в детстве, Перенесенные заболевания и т.п.

### **1.2. Типы проблем в медицине**

Большинство проблем, решаемых в медицине, можно описать взаимоотношениями между объектами исследования, их характеристиками и условиями внешней среды. Проблема формулируется тогда, когда какая-нибудь из перечисленных компонент является неизвестной и должна быть получена, выведена из остальных компонент. Соответственно, проблемы в медицине делятся на три класса:

1. Проблемы анализа. В этих проблемах исследуется вопрос о том, какие характеристики имеют заданные объекты в определенных, заданных условиях внешней среды.
2. Проблемы синтеза. Эти проблемы – недетерминированные, в них необходимо найти объекты, которые в заданных условиях среды обеспечат получение требуемых характеристик.
3. Проблемы оценки и поиска внешней среды, в которой заданные объекты проявят требуемые характеристики.

Например, в отношении лекарственных средств проблемой первого типа будет изучение фармакокинетики препаратов, второго типа – выбор лекарства для назначения конкретному пациенту. К проблеме третьего типа относится исследование показаний к применению и условий применения препарата (определение групп пациентов, для которых данное лечение эффективно, оценка влияния на эффективность лечения других препаратов и показателей гомеостаза, определение оптимальных условий приема препарата).

Подходы к решению этих проблем различны. Можно выделить три типа решений, принимаемых человеком:

**Дедуктивный** тип относится к классу строгих решений и представляет выведение заключений из некоторых заданных правил. Примером могут служить законы логики, любые математические функции. Дедуктивный тип решений позволяет по входным данным узнать, что будет на выходе алгоритма, правила. Например:

Информация на входе: Я знаю, что у больного количество лейкоцитов значительно выше обычного.

Правило: Лейкоцитоз наблюдается при воспалении.

Вывод: В организме больного идет процесс воспаления.



**Абдуктивный** тип решений (обратная дедукция) ставит целью выведение наиболее вероятных исходных утверждений из некоторых заключений путем обратных преобразований. Например:

Информация на входе: Я знаю, что у данного больного идет процесс воспаления.

Правило: При воспалении обычно наблюдается лейкоцитоз.

Вывод: У больного должен наблюдаться лейкоцитоз.

**Индуктивный** тип решений ставит целью выявление наиболее вероятных закономерностей, вытекающих из сопоставления исходных данных и известных результатов. Например:

Информация на входе: В своей практике я часто наблюдал лейкоцитоз у больных с процессами воспаления.

Вывод: Правило "Лейкоцитоз наблюдается при воспалении".

Исторически сложились два подхода к индуктивному выводу:

- Перечислительный (эnumerативный) связан с работами Аристотеля и Рассела, этот подход заключается в выявлении непротиворечивого множества случаев (фактов, образцов).
- Элиминативный подход направлен на установление причинно-следственных связей, развит в работах Эпикура, Ф.Бекона, Д.С.Милля.

Английский логик Джон Стюарт Милль в середине XIX века писал: «Понятие о причине есть корень всей теории индукции». Он предложил ряд методов для получения индуктивных выводов на основе простых критериев причинно-следственных отношений:

- Метод сходства. Если случаи, в которых мы наблюдаем явление, имеют общим лишь одно обстоятельство, то оно и есть причина (следствие) данного явления.

ЕСЛИ  $A$  и  $X \Rightarrow Y$  И  $B$  и  $X \Rightarrow Y$ , ТО  $X \Rightarrow Y$ .

- Метод различия. Если случаи, в которых мы наблюдаем явление, отличаются от иных только по одному обстоятельству, то оно и есть причина (следствие) данного явления.

ЕСЛИ  $A$  и  $X \Rightarrow Y$  И  $A$  и  $\neg X \Rightarrow \neg Y$ , ТО  $X \Rightarrow Y$ .

- Метод остатков. Если из явления вычесть часть, являющуюся следствием известных предыдущих явлений, то остаток будет следствием остальных

ЕСЛИ  $Z$  и  $X \Rightarrow Y$  и  $W$  И  $Z \Rightarrow W$ , ТО  $X \Rightarrow Y$ .

Эти принципы справедливы, если только в описании ситуации присутствует полный перечень факторов и явлений, а надежность выводов зависит от количества наблюдаемых случаев.

Формализуя типы решений, обозначим совокупность входных переменных  $X$ , результатов –  $Y$ , а преобразующее их правило –  $H$ :

Типы решений	Основные параметры	
	Дано	Найти
Дедуктивный	$X, H$	$Y$
Абдуктивный	$Y, H$	$X$
Индуктивный	$X, Y$	$H$

Дедуктивный тип вывода всегда приводит к решению при его наличии. Дедукция – это применение известных законов, не обязательно сопровождается получением новых знаний. Второй и третий типы выводов не всегда имеют единственное решение, могут не иметь его вообще. Индукция порождает новые знания из частных, из данных и имеющихся

ранее знаний, этот способ вывода «интеллектуальнее» и часто встречается в деятельности ученых.

Возвращаясь к типам проблем в медицине, отметим, что способ решения проблем анализа обычно близок к линейному. Сущность проблемы описывается моделью, метод оценки параметров которой в заданных условиях среды известен. Для этих проблем характерен дедуктивный тип принятия решений, а поиск этих решений чаще происходит в рамках алгоритмического подхода.

Проблемы синтеза лучше решать итеративно. Для этого создается набор исследовательских моделей, они сравниваются с требуемыми характеристиками, из них выбираются лучшие, модели меняются, вновь конструируются и т.п. Адекватным таким проблемам является индуктивный тип умозаключений, и для поиска решений чаще применяется эвристический подход.

Отметим наиболее существенные отличия алгоритмического и эвристического подходов к принятию решений. Алгоритмический подход предполагает относительную простоту и локальность закона, определяющего параметры системы в некоторый момент времени, а также однозначность определения этих параметров. В рамках эвристического подхода такие требования отсутствуют. Кроме того, при использовании эвристического подхода существует возможность неполучения результата, которая исключена при использовании алгоритмов.

## 2. АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Ключевым словом в данном разделе является алгоритм. Значение этого термина можно сформулировать как точно определенную последовательность действий, и не только математических, но и любых других (физические действия, мыслительные, поведенческие акты). Это основное, но не единственное свойство алгоритма. Каждый алгоритм должен иметь входные и выходные данные, должен быть конечен и применим для решения некоторого класса сходных задач. В основе классического программирования лежат именно алгоритмы.

Вычислительные методы, основанные на попытках алгоритмического представления клинических данных, применяются в медицине давно. Примерами могут служить акушерские календари для определения срока беременности, различные балльные методы, в которых каждому симптому приписывается вес на основе клинического опыта. С распространением ЭВМ в медицине стали развиваться детерминистские подходы, в рамках которых каждое заболевание описывалось набором симптомов с альтернативным проявлением и, соответственно, имело свой двоичный код. Реализацией этого подхода являются матричные алгоритмы – наиболее простые способы автоматизации дифференциальной диагностики. Суть их – сопоставление набора симптомов пациента с наборами, характерными для разных заболеваний, и установление диагноза при их совпадении. Для эффективного использования таких методов необходима строгая классификация заболеваний и одинаково понимаемое описание симптомов. Матричные алгоритмы используются в учебном

процессе, удобны для обучения дифференциальной диагностике.

Алгоритмический подход в медицине сохраняет свою актуальность. В настоящее время это связано с мировой тенденцией к объективизации процессов обследования больного и назначения лечения, т.е. с развитием доказательной медицины. Исходной точкой любого алгоритма в медицине являются данные, основой его работы служат определенные методы, а выводы формулируются в соответствии со способами принятия решений. Именно этим трем аспектам алгоритмического подхода посвящен данный раздел.

### ***2.1. Характеристики данных и организация исследований в медицине***

Нередко при изучении алгоритмических подходов к диагностике и прогнозированию патологии основное внимание уделяется методам, и недостаточное – данным. Однако именно данные являются самой важной компонентой медицинских исследований и диагностики. Основной особенностью данных в медицине являются их разнотипность, плохая структурированность, зависимость от конкретной предметной области. Например, в кардиологии диагностика в значительной степени опирается на количественные и структурированные данные, в психиатрии же доля таких данных незначительна.

Для эффективного использования алгоритмического подхода данным желательно придать четкий, формализованный, структурированный и количественный, насколько возможно, вид. Корректность подготовки данных связана с тем, кто занимается этой подготовкой. Оптимальным является использование выпускников отделения медицинской кибернетики медико-биологических факультетов. Эти

специалисты готовы к обработке любых типов данных, к тому, что они будут не структурированы и не упорядочены, что цель их обработки, определение критериев эффективности диагностики будут определяться в процессе работы.

Рассмотрим основные свойства и характеристики данных.

### **2.1.1. Шкалы измерения данных**

Любые данные – это результат измерения, оценки некоторого состояния объекта или процесса. Операция измерения ставит определенное обозначение в виде числа или символа в соответствие этому наблюдаемому состоянию. Наличие этого соответствия обеспечивает то, что результаты измерений содержат некоторую информацию о наблюдавшемся объекте. Нужную нам информацию мы получаем из результатов измерений с помощью их преобразований, т.е. путем обработки данных.

Выполняя действия с данными, надо всегда помнить, какие реальные объекты ими характеризуются. Совершенно очевидно, что нельзя проводить арифметические действия над текстовыми и логическими величинами. Менее очевидно, что над разными числами не всегда можно производить одни и те же действия.

Проводя измерения, мы явно или неявно ориентируемся на определенную шкалу измерения. Например, диагноз больного – это текстовое обозначение или шифр, а активность трансаминазы – число. И те, и другие данные имеют вполне определенное множество допустимых значений, которое расположено на некоторой шкале измерений. Для каждой шкалы допустимы вполне определенные виды преобразования данных. Преобразования называются допустимыми, если не

приводят к потере или искажению информации, содержащейся в символьном или в числовом представлении в данных.

Рассмотрим особенности наиболее распространенных шкал измерений.

1. Шкала наименований (номинальная, классификационная). Эта шкала применяется для дискретных по своей природе явлений. Измерение в шкале наименований состоит в определении принадлежности объекта к одному из классов, расположенных на этой шкале. При этом все объекты одного класса считаются одинаковыми, а каждый класс некоторым образом обозначается. Множество таких обозначений образует шкалу наименований.

Присваиваемое классу объектов обозначение может быть произвольным (текст, символы, номера), единственным требованием является их отличие друг от друга. В любом случае обозначения классов имеют смысл символов, а не чисел. Естественно, что ни арифметические операции над ними, ни определение, какое из них больше (лучше) другого, не имеют смысла. С данными в шкале наименований можно выполнять только операцию проверки их совпадения или несовпадения. Статистическая обработка результатов этой операции может включать более сложные методы: определение количества совпадений с разными классами, сравнение относительных частот классов. При этом используются тест хи-квадрат, коэффициент согласия, F-критерий Фишера и пр.

Для шкалы наименований допустимы любые преобразования, сохраняющие различия в обозначениях, информация при этом не искажается и не теряется.

Например, телефонные коды городов – числовые, но эти номера являются лишь обозначениями классов, которые расположены на шкале наименований. Из того, что код города Томска 382, а Новосибирска – 383, нельзя сделать никаких выводов, кроме одного – они различны. Названия болезней (нозологическая классификация) также измеряются в шкале наименований. В этом случае ясно видна условность внутриклассовой эквивалентности объектов (больных с определенным диагнозом). Стратегия лечения больного, а не болезни – яркий пример различий между объектами, относящимися к одному классу шкалы наименований.

2. Порядковая (ранговая) шкала используется, если классы могут быть упорядочены, то есть выполняется условие транзитивности классов: ЕСЛИ  $A > B$  И  $B > C$ , ТО  $A > C$ .

Обозначив такие классы любыми знаками и установив между этими знаками отношения порядка (больше, меньше, лучше, хуже), мы получим порядковую шкалу. Характерной особенностью порядковой шкалы является то, что отношение порядка ничего не говорит о расстоянии между сравниваемыми классами. Поэтому порядковые данные, даже если они представлены числами, нельзя рассматривать как числа и выполнять над ними арифметические действия, можно только устанавливать их эквивалентность и сравнивать.

Примером типичной порядковой шкалы является пятибалльная система оценивания знаний учащихся. Порядок оценок одинаков в любой школе и у любого педагога, однако расстояние между оценками по этой шкале, очевидно, зависит от точки зрения и характера педагога, от среднего интеллектуального уровня учеников, от традиций школы. Поэтому вычисление среднего балла и сравнение его у



выпускников разных классов и, тем более, школ математически некорректно.

Даже если состояния, допускающие только порядковые сравнения, измеряются через косвенные величины, фиксированные в числовых шкалах, эти измерения корректно рассматривать в рамках порядковой шкалы. Например, сравнить интеллектуальные способности можно лишь в терминах лучше/хуже, т.е. в порядковой шкале. Изучать же их можно, например, определяя время, затраченное на решение стандартных задач. Несмотря на то, что этот косвенный показатель интеллекта имеет количественную природу, корректно рассматривать его в порядковой шкале измерений.

Для порядковых шкал не может быть общепринятого стандарта, они имеют смысл только для исследуемого множества сравниваемых классов или объектов. В этой шкале допустимы любые преобразования, сохраняющие различия в обозначениях классов и их порядок.

3. Шкала интервалов. Если мы можем определить расстояние между любыми двумя из исследуемых классов (объектов) и выразить его в единицах, хотя и произвольных, но одинаковых по всей длине шкалы, то мы имеем дело со шкалой интервалов. Эта шкала имеет произвольную точку начала отсчета, произвольные единицы измерения расстояния между объектами, но отношения любых двух интервалов в данной шкале сохраняются неизменными.

Данные, которые измеряются в шкале интервалов, по своей природе либо не имеют абсолютного нуля, либо допускают свободу выбора в установлении начала отсчета. Примерами таких величин являются температура, время, высота местности. Для шкалы интервалов допустимы любые

линейные преобразования, например, масштабирование, сдвиг по шкале ( $y=ax+b$ ).

Название шкалы подчеркивает, что в ней только интервалы имеют смысл настоящих чисел и только над интервалами можно выполнять арифметические операции. Если анализировать измерения в этой шкале, забыв об их относительности, то можно получить неверные результаты. Информация о том, что температура воды достигла 100 градусов, очень различна в зависимости от того, к какой шкале измерения привыкли люди – Цельсия или Фаренгейта.

Частным случаем шкалы интервалов является шкала разностей (циклическая, периодическая). Эта шкала инвариантна к сдвигу (к преобразованию  $y = x+b$ ). Так измеряются время суток, направление по компасу, фаза колебаний.

4. В шкале отношений измеряются величины, имеющие абсолютный нуль, но допускающие свободу в выборе единицы измерения. Уже не интервалы, а измерения в этой шкале являются полноправными числами, с ними можно выполнять арифметические операции. Для шкалы отношений допустимо преобразование масштабирования ( $y = ax$ ). Примерами величин, измеряемых в шкале отношений, являются длина, вес, деньги.

5. Абсолютная шкала имеет абсолютный нуль и абсолютную единицу измерения, она уникальна – это числовая ось. Важной ее особенностью является безразмерность, что позволяет использовать измерения в этой шкале в качестве показателя степени и аргумента логарифма. Числовая ось как вспомогательное средство присутствует во всех остальных шкалах измерений.

Чем меньше преобразований допустимо для шкалы, тем более информативно полученное в ней измерение. И, напротив, чем более информативно измерение, тем меньше свободы преобразования шкалы оно допускает. Это свойство данных отражено в термине "сила шкалы". Шкала, допускающая меньшее количество преобразований, называется более сильной. Например, порядковая шкала в сравнении со шкалой наименований более сильная, поскольку не допускает преобразований, нарушающих порядок. Самая сильная шкала – абсолютная.

Поскольку с измерениями, проведенными в шкалах наименований и порядка допустимы только операции сравнения, то эти шкалы называют качественными. Шкалы интервалов, отношений и абсолютная называют количественными, так как с результатами измерений в этих шкалах можно производить арифметические операции.

Шкала измерения, ориентированная на объективные отношения, которым подчинена наблюдаемая величина, называется согласованной. Лучше всего производить измерения в той шкале, которая максимально согласована с этими отношениями. Применение более слабой шкалы, чем согласованная, приведет к потере части полезной информации. Применение более сильной шкалы опасно: полученные данные могут быть неправильно обработаны и интерпретированы.

Аналогичная ситуация имеет место и после того, как проведены измерения. Если данные переводятся в более слабую шкалу (например, из шкалы интервалов или отношений в порядковую), то обычно исследователь отдает себе отчет в том, что в результате происходят некоторая потеря информации и ухудшение качества выводов. Иногда же производится

усиление шкалы. Типичный случай – "оцифровка" качественных шкал (наименований и порядковой шкалы): классам присваиваются номера, с которыми в дальнейшем обращаются, как с числами. Если при этом не выходить за пределы допустимых преобразований, то "оцифровка" – лишь перекодировка в другую форму обозначения классов. Но использование арифметических операций над преобразованными в числовую форму обозначениями классов приводит к ошибкам. Шкала измерений становится несогласованной, а свойства данных, навязываемые подобным образом, на самом деле не имеют места.

### **2.1.2. Основные параметры, характеризующие данные**

В какой бы шкале мы ни проводили измерения, мы не можем гарантировать отсутствие в данных погрешностей. Общеизвестны два типа ошибок измерений – систематические и случайные.

Работая с медицинскими данными, необходимо принимать во внимание следующее:

- Больные свободны в своем поведении, квалификация врачей различается, а каждый врач имеет свое мнение, поэтому результаты исследований могут быть подвержены систематическим ошибкам, приводящим к смещению данных.
- Любые наблюдения подвержены влиянию случайных, неконтролируемых факторов, вносящих "шум" в данные.
- Помимо клинического мышления и интуиции, необходимо полагаться на строгие научные принципы, использовать методы минимизации систематических и учета случайных ошибок.

Систематические ошибки (смещение, bias) могут быть различными. Пусть в ходе клинического испытания выяснилось, что препарат А эффективнее препарата В. Ничего не зная об условиях проведения исследования, можно вообразить следующие причины систематических ошибок:

- препарат А приятнее на вкус, поэтому больные охотнее его принимают,
- препарат А новый и популярный, поэтому больные строже соблюдают схему лечения,
- препарат А проходит апробацию в клинике, поэтому врачи строже следят за соблюдением схемы лечения,
- препарат А назначен группе больных, характеризующейся в среднем меньшей тяжестью заболевания.

В хорошо организованном исследовании возможность этих предположений должна быть ликвидирована на этапе его планирования.

В типичных медико-биологических исследованиях самыми распространенными являются три вида систематических ошибок, обусловленные:

- отбором, когда сравниваемые группы пациентов отличаются не только по исследуемому признаку, но и по другим факторам, влияющим на результат исследования (возраст, пол, степень тяжести заболевания, предшествующие методы лечения),
- измерением, когда в сравниваемых группах используются разные методы измерения и оценки информации,
- вмешивающимися факторами, когда один фактор связан с другим, и эффект одного искажается эффектом другого.

Например, целью исследования является ответ на вопрос: Снижает ли регулярная физическая тренировка риск

ишемической болезни сердца? Пусть исследование проведено среди работников завода, пожелавших участвовать в тренировках, и, для сравнения, в группе отказавшихся от регулярных физических упражнений. Проявления ишемической болезни сердца выявлялись при периодическом обследовании, включавшем сбор анамнеза, ЭКГ, общую проверку состояния здоровья. Группа тренирующихся обследовалась в медицинском кабинете при спортивном зале, группа сравнения – в поликлинике предприятия. Частота проявлений ИБС оказалась статистически достоверно ниже в группе тренировавшихся работников, что было интерпретировано как доказательство положительной роли физических упражнений в профилактике ИБС. Сам факт не вызывает сомнения, но насколько он обоснован полученными данными?

В организации данного исследования не учтена возможность возникновения систематических ошибок:

- Исследованные группы могли быть изначально различны по ряду существенных для ИБС параметров – наследственной отягощенности, уровню липопротеидов крови, которые не оценивались до формирования сравниваемых групп. Распределение по этим признакам должно было быть оценено до начала исследования.
- Группы были обследованы в разных местах. В силу этого, очевидно, разные специалисты собирали анамнез, проводили осмотр, для электрокардиографии были использованы разные аппараты.
- Можно предположить, что в группу тренировавшихся были включены люди, привыкшие заниматься спортом, т.е. следящие за своим здоровьем. Вполне возможно, что они старались правильно питаться, доля курящих среди них

могла быть меньше, а эти факторы являются важными для развития ИБС.

В другом исследовании определялось соответствие между электронным и аускультативным определением частоты сердечных сокращений (ЧСС) плода. Если ЧСС была в пределах нормы, наблюдались лишь небольшие случайные вариации данных. В случае слишком высокой или низкой ЧСС при аускультации наблюдался систематический тренд в сторону более характерных для нормы значений. Известно, что существенное изменение ЧСС свидетельствует о неблагополучии плода и, возможно, о необходимости стимуляции родов и других активных мероприятий. Наблюдаемая систематическая ошибка была обусловлена психологическими причинами, склонностью врача надеяться, что состояние плода нормальное и активное вмешательство не понадобится.

Возможность систематической ошибки, конечно, не означает ее наличие. Теоретически смещение данных можно предотвратить или скорректировать, но только если причины этого известны. Никакая статистическая обработка не в состоянии скорректировать неизвестную систематическую ошибку. Поэтому при плохом плане эксперимента статистическая обработка данных не имеет смысла и не дает ничего, кроме ложного наукообразия.

Случайная ошибка возможна на любом этапе клинического наблюдения: при отборе, формировании групп, измерении, оценке результатов. Случайная вариабельность оценивается статистическими методами, ее никогда нельзя полностью исключить, но можно уменьшить правильным планированием эксперимента.

Различают следующие виды variability результатов:

1. Аналитическая variability зависит от метода измерения и оценивается расхождением между результатами многократных измерений на одной пробе, отражая случайные погрешности метода.

2. Внутрииндивидуальная variability зависит от изменения состояния объекта измерения (времени суток, сезона и т.п.), отражает случайные и систематические погрешности измерений.

3. Межиндивидуальная variability зависит от разнообразия объектов в популяции, от степени однородности сформированной выборки, то есть в значительной степени от систематических погрешностей.

4. Суммарная variability представляет совокупность всех упомянутых типов variability.

Чтобы оценить указанные вариации, надо достаточно большую группу людей обследовать несколько раз с различными интервалами времени, а некоторые измерения провести многократно, например, параллельно проанализировать несколько частей одной пробы. Внутрииндивидуальная variability при этом оценивается по разности между variability результатов при повторных измерениях у одного субъекта и аналитической variability. Межиндивидуальная variability – по разности между суммарной variability и суммой аналитической и внутрииндивидуальной variability.

Аналитические вариации должны быть малы по сравнению с межиндивидуальными. Для их сравнения



используется коэффициент надежности:  $K = 1 - \frac{\sigma_A^2}{\sigma_M^2}$ , где

$$\sigma_A^2 = \sum_{k=1}^n (\sigma_{A_k}^2 / n) \quad - \quad \text{оценка дисперсии повторных}$$

измерений одного образца, т.е. показатель аналитических вариаций,

$$\sigma_M^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (\bar{x}_k - \bar{x})^2}{n-1} \quad - \quad \text{оценка дисперсии измерений разных}$$

образцов.

Если аналитические вариации малы по сравнению с межиндивидуальными, то коэффициент надежности приближается к 1. Обычно принимается, что аналитическая вариабельность не должна быть более 20% от межиндивидуальной. На практике далеко не все данные отвечают этому критерию. Аналитические вариации составляют менее 20% от межиндивидуальных для билирубина, креатинкиназы, азота мочевины, однако превышают 40% межиндивидуальной вариабельности при определении натрия, калия, кальция, белка, глюкозы, лактатдегидрогеназы в плазме крови.

Для достижения высокой диагностической эффективности метода необходимо, чтобы внутрииндивидуальные вариации признаков были сведены к минимуму. Для большинства параметров внутрииндивидуальные вариации меньше межиндивидуальных, но далеко не всегда настолько, чтобы ими можно было пренебречь. Внутрииндивидуальные вариации могут превышать межиндивидуальные при определении натрия, калия, хлоридов,

кальция. Индивидуальные вариации параметров форсированного выдоха в течение дня составляют около 25% от межиндивидуальных, а у лиц с хроническими заболеваниями легких – около 50%. Индивидуальные вариации тех же параметров при исследовании с недельными интервалами в группе здоровых достигают 50% от межиндивидуальных, а у больных эти показатели сравнимы.

Внутрииндивидуальные вариации можно существенно снизить правильным планированием эксперимента, так как на них сильно влияют систематические погрешности. Кроме того, необходимо стандартизовать условия обследования. Пока состояние обследуемых людей недостаточно контролируется и зависит от неучтенных факторов, любые затраты на повышение точности результатов, то есть снижение аналитической вариабельности, будут неэффективны.

В целом в результате измерения мы получаем некоторый признак, являющийся основой для принятия решения. Этот признак может быть охарактеризован по нескольким параметрам:

1. Достоверность (точность) – отражает близость результатов измерения к истинному значению, высокая точность соответствует малым систематическим и случайным погрешностям. Для количественных данных достоверность проверяется сравнением со стандартом. Клинические симптомы часто невозможно проверить физическими, стандартизуемыми методами. Для обеспечения достоверности таких данных рекомендуется, чтобы в процессе определения симптома:

- были охвачены все аспекты изучаемого явления и никакие другие,

- результаты были согласованы с другими оценками того же явления (с мнением других специалистов),
- результаты позволяли надежно предсказать вывод (диагноз), который предполагалось получить.

2. Правильность – отражает близость к нулю систематических погрешностей.

3. Сходимость – отражает близость друг к другу результатов измерений, выполненных в одинаковых условиях, т.е. близость к нулю случайных погрешностей.

4. Воспроизводимость – отражает близость друг к другу результатов измерений, выполненных в разных условиях. Этот параметр зависит не только от точности методов, но и от стабильности характеристик объекта. Измерение массы тела можно выполнить с точностью до долей грамма, но это лишено смысла, так как в течение дня этот показатель может измениться на сотни граммов.

Точность означает одновременно правильность и сходимость, однако сходящиеся и воспроизводимые измерения могут быть неточными.

Для характеристики данных используется также термин «валидность». Содержательная валидность обозначает соответствие сущности применяемого теста измеряемому качеству, воспроизводимость результатов иногда обозначают как валидность измерения. Внутренняя валидность является синонимом достоверности исследования, т.е. оценки того, в какой мере полученные результаты справедливы в отношении данной выборки. Она определяется наличием и выраженностью систематических и случайных ошибок.

Достоверность – необходимое, но не достаточное условие того, что данное исследование диагностически полезно.

Внешняя валидность, или обобщаемость определяется тем, насколько полученные результаты применимы к другим группам больных. Этот параметр зависит от обоснованности допущения, что пациенты в проведенном исследовании сравнимы с другими, подобными им. Результаты высокодостоверного исследования могут привести к ошибкам в случае их низкой обобщаемости.

Обобщаемость в значительной степени зависит от репрезентативности исследуемой выборки, т.е. соответствия ее по клиническим параметрам тому контингенту больных, к которому планируется применение полученных результатов. Если выборка по важным для данного исследования параметрам отличается от контингента больных, являющегося целью изучения, то она называется смещенной. Пациенты больницы могут являться смещенной выборкой относительно больных, проживающих в некотором районе города.

Если данные получены в стационаре, а использовать их планируется в поликлинике, то результат может оказаться ошибочным. Например, больным с диаметром аневризмы аорты менее 5 см обычно не советуют проводить операцию. Однако, частота разрыва аорты за 5 лет наблюдения в специализированном центре у таких больных оказалась в 10 раз выше, чем в общей популяции. Казалось бы, этот факт обосновывает расширение показаний к оперативному вмешательству при данной патологии. Но в специализированные центры больные направляются уже с симптомами, связанными с угрозой разрыва. Если бы врачи общей практики использовали эти данные, риск разрыва аорты был бы значительно завышен, что привело бы к неверному решению о хирургическом вмешательстве.

В другом исследовании было показано, что среди психически больных, зарегистрированных в стационаре, больше злокачественных и шизоаффективных форм шизофрении, чаще наблюдаются приступы, больше средняя продолжительность госпитализации по сравнению с данными о больных, зарегистрированных в диспансере. Кроме того, в первой группе больных больше среднее количество родственников в семье, а также количество больных шизофренией среди них. Все эти отличия можно объяснить одним важным фактором – априорно повышенной вероятностью госпитализации для больных, уже зарегистрированных в стационаре.

Трудно добиться репрезентативности выборки в условиях широкого клинического спектра, на который влияют выраженность патологии, сопутствующие состояния, давность заболевания, постепенно уменьшающая долю неспецифических изменений и формирующая совокупность специфических признаков болезни. Значительная часть исследований проводится в медицинских центрах, где лечатся в основном больные с тяжелыми и сложными случаями, и на основании результатов этих исследований опасность заболевания может переоцениваться.

### **2.1.3. Типы клинических исследований**

Репрезентативность выборки и обобщаемость результатов зависят от правильной организации испытаний. Перечислим основные типы исследований:

1. Описание случаев (case report). 20-30% оригинальных статей в зарубежных журналах посвящено подробному описанию одного или нескольких случаев. Это способ сообщения о редких клинических проявлениях, источник гипотез о патогенезе, прогнозе и т.п. Целью этих исследований

является выдвижение гипотез, а не их проверка. Однако описание случаев может помочь в понимании патогенеза заболевания. Гипотеза о том, что галотан (средство для ингаляционного наркоза) может вызывать гепатит, подтвердилась на примере анестезиолога с рецидивирующим гепатитом, регулярно обострявшимся после контакта с галотаном.

Однако в описаниях случаев чаще представляется успешный опыт лечения. К тому же даже совпадение достаточно редких событий не является доказательством их связи: если некоторое лекарство принимает 1% населения, а терминальная стадия почечной недостаточности наблюдается у 40 человек на миллион населения в год, то в России ежегодно можно ожидать около 100 случаев совпадений этих событий.

2. Исследование серий случаев (case series). Эти исследования описывают результаты, полученные на группе больных, и могут быть статистически обработаны. Однако в клинических работах такого типа не предполагается наличия групп сравнения, что не позволяет использовать их для проверки гипотез. Иногда отсутствие контрольной группы не столь принципиально: при исследовании 1000 больных СПИДом в США 94% больных были гомо- или бисексуалы, наркоманы, уроженцы Гаити и больные гемофилией, что прояснило возможные пути заражения.

С другой стороны, частое совпадение двух событий может привести к ошибочным выводам в отсутствии группы контроля. Врачи часто объясняют боли в пояснично-крестцовой области выпячиванием межпозвоночных дисков, которое действительно обнаруживается у большинства больных в ходе магнитно-резонансной томографии. Но при исследовании

контрольной группы лиц сходного возраста, не предъявлявших жалобы на боли, была выявлена практически такая же частота деформации дисков, что ставит под сомнение предполагаемую причинно-следственную связь.

3. Одномоментное исследование (поперечное исследование, cross-sectional study, prevalence survey). В ходе таких работ производится описание популяции или выборки в какой-то определенный момент времени с целью оценки распространенности заболеваний, частоты определенных исходов, типов течения и других клинических параметров.

4. Исследование до-после (before-after study) заключается в изучении изменения параметров после определенного воздействия на одной опытной выборке. Эти исследования имеют целью проверку гипотез, например, оценку эффективности врачебного вмешательства. В таких неконтролируемых клинических испытаниях всегда есть опасность систематических ошибок, особенно обусловленных вмешивающимися факторами.

5. Исследование случай-контроль (case control study). Является ретроспективным исследованием, т.е. к моменту регистрации пациентов все изучаемые исходы уже состоялись, они являются одним из критериев формирования групп. Факторы, которые могли бы повлиять на исходы, выявляются по данным медицинской документации, опросам и т.п. При ретроспективных исследованиях по состоянию здоровья на день обследования подбираются группы больных и здоровых, а затем анализируются особенности их анамнеза, поведения, питания в прошлом и другие «факторы риска». Целью работ типа случай-контроль обычно является проверка гипотез

относительно причин заболевания, факторов риска его возникновения.

В исследовании обязательно присутствует контрольная группа, в идеале обе группы репрезентативны общей популяции, а число наблюдений достаточно для статистической обработки. Выделяют два варианта этого типа исследований:

- с историческим контролем, результаты опытной группы сравниваются с данными наблюдений аналогичных пациентов в прошлом,
- с параллельным контролем, когда обе исследуемые группы формируются одновременно.

В исследованиях такого типа возможно значительное количество систематических ошибок из-за искусственного формирования групп сравнения, которые в идеале должны не только быть случайными выборками из одной популяции, но и иметь одинаковую вероятность подвергнуться воздействию изучаемого фактора. Основная группа должна включать типичные для субпопуляции больных случаи, желательно недавно развившиеся. Это необходимо для оценки заболеваемости, так как распространенность болезни является функцией двух переменных – интенсивности ее возникновения и продолжительности. Контрольная выборка может формироваться как случайная из незаболевших представителей популяции, методом подбора пар (каждому больному – одного или несколько здоровых), нескольких контрольных групп, по-разному сформированных.

Но всегда останутся систематические ошибки, обусловленные сутью (ретроспективностью) метода: влияние исхода на воздействие, на воспоминание о нем (больного), на его оценку или регистрацию (врачом). Однако эти исследования



просты, часто выполняются, могут направить поиск причин патологии в нужное русло.

Для установления причинно-следственной связи между предполагаемым фактором риска и заболеванием по результатам исследования случай-контроль желательно выполнение нескольких из перечисленных критериев:

- причина предшествует эффекту,
- большой относительный риск (отношение шансов),
- зависимость эффекта от дозы,
- обратимость при ослаблении воздействия,
- эффект наблюдается разными исследователями, в разное время, в разных условиях,
- эффект согласуется с современными научными представлениями,
- специфичность: одна причина – один эффект,
- аналогия: связь установлена для сходного заболевания.

В противном случае могут быть получены фиктивные ассоциации между заболеванием и признаком при неслучайном отборе людей для исследования. Например, патогенетически некоторое заболевание и признак не связаны, но выявляемость заболевания не абсолютная, а высокие значения признака доставляют беспокойство человеку. Лица с повышенными значениями признака будут чаще обращаться к врачу, поэтому у них будет чаще выявляться патогенетически не связанное с признаком заболевание. Таким образом в группе больных высоких значений признака будет больше. После статистической обработки будет сделан вывод о диагностической значимости признака или его роли в патогенезе заболевания.

6. Когортное исследование (продольное, проспективное, longitudinal, cohort study). Исследуемые группы формируются в отсутствии знаний об исходе заболевания, а затем находятся под наблюдением в течение длительного времени. В начале наблюдения регистрируются факторы, которые могут повлиять на возникновение и течение болезни, но исходы становятся ясными по истечении продолжительного времени. Цели таких исследований довольно разнообразны – изучение заболеваемости, исходов, поиск причин заболеваний и факторов риска, прогнозирование.

Сравним два последних типа исследований на примере одного фактора риска:

	Больные	Здоровые
Был фактор	A	B
Не было фактора	C	D

При когортном исследовании основной группой будет A+B, группой сравнения – C+D. Болезненность в группе, подвергавшейся воздействию фактора, составит  $A/(A+B)$ , не подвергавшейся –  $C/(C+D)$ , относительным риском является их частное.

При исследовании случай-контроль основная группа – это A+C, группа контроля – B+D. В этом случае способа вычисления болезненности нет, так как эти группы сформированы неестественным способом и относительный риск рассчитать нельзя. Но нам известна частота обнаружения фактора в обеих группах, поэтому можно рассчитать показатель риска, называемый отношением шансов, который равен  $AD / BC$ . Когда отношение шансов больше 1, это указывает на

повышенный риск, т.е. по смыслу эти два показателя близки. Отношение шансов примерно равно относительному риску, когда болезненность в группе, не подвергавшейся воздействию фактора, менее 1%, что справедливо для многих заболеваний.

7. Нерандомизированные клинические испытания (контролируемые исследования до-после) целью имеют проверку гипотез относительно эффективности лечения и профилактики. Группы больных должны быть репрезентативны, часто используют подбор больных для контрольной группы по сходству с одним из больных опытной (подбор пар). Вероятность включения больного в одну из групп может быть неизвестна, а может быть оценена или задана.

8. Рандомизированные клинические испытания преследуют те же цели, но отличаются случайным выбором больных для включения в опытную либо контрольную группу. Этот тип испытаний считается наиболее доказательным, особенно при использовании слепых (маскированных, blinding, masking) исследований. Различают простой слепой метод, при котором пациент не знает, например, какое лекарство он принимает, двойной слепой – при котором об этом не знает и врач, и тройной – когда этого не знает и лицо, проводящее статистическую обработку результатов.

#### **2.1.4. Референтные величины и группы**

Результаты клинических исследований должны оцениваться с точки зрения надежных критериев. Но в настоящее время данных когортных исследований недостаточно для оценки результатов теста, исходя из вероятности развития заболевания в будущем. Чаще используется сравнение с результатами, полученными на здоровых людях, с так называемой «нормой», т. е. результаты ретроспективных

исследований случай-контроль. В практике "нормы" – это данные, полученные на нескольких десятках здоровых людей, часто без указания критериев отбора в группы «здоровых», без описания условий получения данных. В качестве здоровых выступают доноры станций переливания крови, медицинский персонал, пациенты травматологических отделений, случайно выбранные люди из популяции. Однако исследования в разных группах могут приводить к разным результатам.

Международной федерацией клинической химии предложен термин "референтные величины". В качестве референтных величин используются оценки признаков, полученные при обследовании групп людей, состояние здоровья которых определено и однородно. Основное отличие этого термина – множественность условий обследования и полная осведомленность врача о них.

При определении референтных величин учитывают следующие основные факторы:

1. Референтную группу и пути ее формирования (пол, возраст, профессия, этнос, основания для включения в выборку, объем выборки).

2. Условия среды и физиологическое состояние при измерении (время года, суток, наличие стрессов, прием лекарств).

3. Техника взятия проб (артериальная, венозная, капиллярная кровь, использование жгута, антикоагулянтов, интервал от взятия крови до измерения, условия транспортировки и хранения).

4. Аналитический метод с указанием точности, воспроизводимости и мер контроля качества.

5. Статистические методы.

Референтные величины являются такими нормами, по отношению к которым соблюдены все условия их разработки и использования.

Для формирования референтной группы здоровых лучше всего использовать случайную выборку из здоровой популяции. Представляется, что критерий долголетия наиболее фундаментален для здоровья, связан с высокой резистентностью организма и т.п. Организм в процессе старения можно рассматривать как постепенно отклоняющийся от оптимального состояния. Оптимально стареть означает стареть медленно. С этой точки зрения, 25-30 лет являются референтным возрастом, и должна существовать только одна референтная группа – этого возраста. В практике чаще используются разные нормы для разных возрастов, а возраст является одним из основных параметров референтной группы. Конечно, оптимальным является использование индивидуальных референтных величин, т.е. полученных в период здоровья у того же человека данных. В этом случае можно обнаружить индивидуальные сдвиги параметров, не выходящие за пределы популяционных норм.

Существуют абсолютные противопоказания к включению в референтные группы здоровых, прежде всего, это наличие системных, хронических и инфекционных заболеваний. Включение в подобную референтную группу лиц с рядом заболеваний допускается через определенный срок после выздоровления.

Наблюдается тенденция отбирать в референтную группу людей с самым высоким уровнем здоровья, исключить минимальные проявления болезни. Например, при исследованиях возможности диагностики инфаркта миокарда по данным ЭКГ из группы здоровых исключаются лица не только с

инфарктом миокарда, но и с поражением клапанов, любыми болезнями миокарда, нарушением проводимости. Следствием этого может стать обнаружение различий, в реальной клинической ситуации не столь явно выраженных или отсутствующих.

В общем можно полагать, что чем полнее компенсация патологии, тем больше соответствие параметров организма с нормой. Однако использование референтных величин здоровых при оценке состояния больных не всегда правильно, поскольку для больных далеко не всегда оптимальны характеристики здоровых. Например, слабая выраженность клинической картины в начале пневмонии увеличивает вероятность затяжного течения болезни и перехода ее в хроническую форму. В связи с этим имеет смысл получение оценка референтных величин в группах больных при определенной стадии заболевания, остроте процесса и т.п.

## **2.2. Характеристики методов диагностики**

Под диагностическим тестом обычно понимают лабораторное исследование. Однако обсуждаемые далее подходы применимы к данным анамнеза, физикального и инструментального исследований, к ситуациям, когда диагностическим тестом служит целый комплекс показателей. Знание эффективности всех этих методов необходимо для принятия обоснованных диагностических решений.

Эффективность теста можно определить как возможность разделять людей, находящихся в различных состояниях, т.е. имеющих любые заранее определенные особенности. В широком смысле эффективность диагностических исследований включает доступность (в том числе экономическую) и приемлемость для пациентов. Подходы

к оценке эффективности тестов разнообразны. Наиболее детально разработаны методы оценки диагностической эффективности, основанные на взвешивании возможных диагностических ошибок и их последствий. Менее разработаны методы, учитывающие индивидуальные предпочтения пациента.

### 2.2.1. Оценка операционных характеристик теста

Для описания эффективности тестов используются так называемые операционные характеристики, которые определяются в условиях качественного описания результата исследуемого теста и наличия "золотого стандарта" – референтного (надежного, заслуживающего доверия) метода. Результаты применения референтного метода считаются истинными, в качестве этого метода могут использоваться мнение эксперта, результаты врачебного консилиума.

Пусть обследованы две группы лиц, принадлежность к которым определена референтным методом – больные (D) и здоровые (H). Обозначим P количество лиц из обеих групп с результатом изучаемого теста, подтверждающим наличие заболевания (положительный результат), а N – количество лиц с отрицательным результатом. Соответственно, PD – количество больных с положительным результатом теста, NH – количество здоровых с отрицательным результатом и т.п.

Чувствительность теста (sensitivity, Se) можно определить как вероятность положительного результата теста у больных,  $Se = p(P|D)$ . Соответственно оценивается эта характеристика долей больных, у которых получен положительный результат теста, или частотой симптома у больных:

$$Se = (PD/D)*100\%.$$

Высокочувствительный тест редко дает ложноотрицательный результат, т.е. редко пропускает больных. Такой тест надо выбрать, если есть риск пропустить опасное, но излечимое заболевание (туберкулез, сифилис, лимфогранулематоз). Высокочувствительный тест особенно информативен, если дает отрицательный результат.

Чувствительность теста не следует путать с его чувствительностью к внешним факторам, которая определяется в терминах надежности и сходимости, а также с чувствительностью метода, как способностью определять минимальное количество вещества.

Специфичность (specificity, Sp) – это вероятность отрицательного результата теста у здоровых,  $Sp = p(N|H)$ , оценивается частотой отсутствия признака или симптома у здоровых людей:  $Sp = (NH/N)*100\%$ .

Тест, характеризующийся высокой специфичностью, как правило, не относит здоровых к категории больных, т.е. редко бывает ложноположительным. Он нужен для подтверждения заболевания, наличие которого предположено на основе других данных. Эти тесты необходимы, если ложноположительный результат может нанести пациенту вред (физический, моральный, финансовый). Специфичный тест наиболее информативен, когда дает положительный результат.

Прогностичность положительного результата теста оценивается по частоте его совпадения с наличием заболевания:  $PP = p(D|P)$ , или  $PP = (PD/P)*100\%$ .

Прогностичность отрицательного результата – это частота его совпадения с отсутствием заболевания:  $PN = p(H|N)$ , или  $PN = (NH/N)*100\%$ .



Прогностичностью называется вероятность состояния (здоров либо болен) при известном результате исследования, т.е. по сути это апостериорная вероятность. Название "прогностичность" не совсем удачно, так как ни о каком предсказании речь не идет, просто соотношение истинных и ложных результатов теста оценивается иным способом.

Итак, если референтная оценка делит изучаемую группу на две части (здоровые и больные, либо больные разными формами патологии), а исследуемый тест дает качественный результат, то операционные характеристики рассчитываются на основе данных приведенной ниже четырехпольной таблицы:

	<b>D</b>	<b>H</b>
<b>P</b>	a	b
<b>N</b>	c	d

$$Se = a / (a+c), \quad Sp = d / (b+d),$$

$$PP = a / (a+b), \quad PN = d / (c+d)$$

В качестве иллюстрации рассмотрим данные об изменениях ЭКГ при инфаркте миокарда:

#### Т и п и н ф а р к т а

Тип ЭКГ	Трансмуральный	Нетрансмуральный	Операционные характеристики
Тип Q	7	8	PP = 7/15 = 47%
Тип ST	5	16	PN = 16/21 = 76%
Операционные характеристики	Se = 7/12 = 58%	Sp = 16/24 = 67%	

На этом примере можно сделать вывод о невысокой эффективности использования Q типа ЭКГ как диагностического признака трансмурального инфаркта миокарда. Однако определение ST типа ЭКГ является

определенным подтверждением отсутствия трансмурального инфаркта.

Если результаты изучаемого теста выражаются количественно, то часто вводится так называемая "точка разделения теста" (cut off point). В данном разделе будем условно считать, что высокие значения диагностического признака характерны для больных, хотя равновероятна и противоположная ситуация. Точка разделения является порогом, превышение которого рассматривается как положительный результат теста. Фактически это означает переход от шкалы отношений или интервалов к более слабой, качественной порядковой шкале.

Точка разделения обычно используется при частичном перекрытии распределений признака у больных и здоровых в случае достоверного отличия средних значений. Диагностическая ценность признака тем выше, чем меньше перекрытие распределений. Чувствительность и специфичность метода зависят при этом от положения точки разделения, а та, в свою очередь, от подходов к диагностике. При строгом подходе к установлению заболевания (определенной оптимистичности) врач выявляет заболевание не у всех больных, т.е. метод имеет в его руках низкую чувствительность. При этом, однако, здоровые редко классифицируются как больные, т.е. высока специфичность метода. Это означает тенденцию к сдвигу точки разделения в область значений, характерных для больных. При строгом подходе к отрицанию заболевания метод имеет большую чувствительность, при этом его специфичность снижается, точка разделения смещена в сторону значений, характерных для здоровой популяции.

Так, при исследовании концентрации глюкозы в венозной крови через час после стандартного завтрака (диагностика сахарного диабета) при точке разделения 5,55 ммоль/л чувствительность теста составила 98%, специфичность – 48%. Эту точку разделения можно назвать скорее пессимистической. При «оптимистической» точке разделения 8,88 ммоль/л чувствительность составляет 55%, а специфичность – 98%. В общем при сдвиге точки разделения к значениям, характерным для больных, снижается чувствительность и растет специфичность. Обратная закономерность наблюдается при сдвиге точки разделения в область нормальных значений.

В диагностическом процессе часто используются несколько тестов либо повторное проведение того же исследования. Последовательное применение серии тестов используется для доказательства наличия заболевания, при этом применяется конъюнктивное правило: положительное заключение выносится, если результат всех тестов положителен. При этом чувствительность батареи тестов снижается, а специфичность растет (скрининг на диабет, глаукому). Вариант применения тестов в серии – их повторное выполнение, подтверждающее положительный результат.

Параллельное проведение тестов применяется для отклонения гипотезы о заболевании, в этом случае используют дизъюнктивное правило. Отрицательное заключение выносится только тогда, когда все тесты дают отрицательный результат, а положительное – если хотя бы один из тестов подтвердил заболевание. В таком варианте повышается чувствительность, а специфичность снижается (скрининг на сифилис).

Так, при симптомах острого аппендицита опасность ложной операции невысока, а ложноотрицательное заключение очень опасно. В этом случае применяется дизъюнктивное правило к следующему набору тестов. Если у пациента в крови более  $10,5/10^9$  лейкоцитов на литр, или палочкоядерных нейтрофилов более 11%, или С-реактивного белка более 1,2 мг/дл, то чувствительность этой батареи тестов приближается к 100%, а специфичность низка – около 50%.

В случае близости средних значений, но разных дисперсий в группах больных и здоровых врачу надо оценивать отклонения как в сторону повышения, так и понижения признака. Возникает потребность в двух точках разделения, т.е. в референтном (дискриминантном) интервале, отделяющем области признаков, характерные для разных групп. Изменение вероятности заболевания происходит как при низких, так и при высоких значениях признака, и зависит от того, в какой группе дисперсия признака больше. Чаще встречается большая дисперсия признака в группе больных, тогда две точки отграничивают интервал, в котором вероятность значений, характерных для здоровых, повышена.

Чувствительность составляет 100%, когда нижняя и верхняя границы дискриминантного интервала совмещаются, и все больные оказываются за его пределами. Чем шире интервал, тем ниже чувствительность метода. С другой стороны, при совмещении границ интервала специфичность равна нулю. По мере расширения интервала специфичность растет, следовательно, как и в случае одной точки разделения, чувствительность снижается при росте специфичности, и наоборот.

Референтный интервал имеет тот же недостаток, что и точка разделения: оценки вероятности заболевания одинаковы для всех значений признака внутри (за пределами) интервала. Это приводит к определенной потере диагностической информации.

### 2.2.2. Шансы и отношение правдоподобия

Действительно, оценивая результаты исследования содержания глюкозы в крови, формально можно использовать одну точку разделения, например 6 ммоль/л. Однако врач все-таки считает, что, чем выше значение признака, тем больше шансов для человека оказаться больным. Вынося свое суждение, врач взвешивает не вероятность болезни у лиц с содержанием глюкозы выше точки разделения, а шанс быть больным для человека с данной концентрацией глюкозы.

Понятие априорных шансов связано с априорной вероятностью заболевания  $p(D)$  в изучаемой группе (преваленсом) и априорной вероятностью отсутствия заболевания:

$$C_a = \frac{p(D)}{1 - p(D)}$$

Отношение правдоподобия означает отношение вероятности обнаружения признака в двух группах, например вероятности признака (или его определенного значения) у больных к аналогичной вероятности у здоровых. Правдоподобие результатов теста у больных оценивается как

$$L_+ = \frac{p(P|D)}{p(P|H)} = \frac{Se}{1 - Sp} \quad \text{для положительного результата,}$$

$$L- = \frac{p(N|D)}{p(N|H)} = \frac{1-Se}{Sp} \quad - \text{ для отрицательного. Если } o$$

субъекте имеется некая информация (обнаружен признак или измерено его значение), то можно вычислить апостериорные шансы заболевания:  $C_p = L * C_a$ .

Например, преваленс равен 0,2 , т. е. шансы в пользу заболевания у случайного человека 1 против 4. Если симптом встречается среди здоровых у 1 из 100, а среди больных у каждого второго, то отношение правдоподобия равно 50. Это означает, что при наличии данного симптома заболевание в 50 раз более правдоподобно, чем при его отсутствии. Апостериорные шансы в этой ситуации равны 12,5, т. е. из 13 лиц с данным симптомом 12, скорее всего, будут больны данным заболеванием.

Представление данных в виде отношения правдоподобия не требует вычисления достоверности, о преобладании одной из гипотез ясно свидетельствует отношение правдоподобия или его логарифм. Для этого удобно использовать график, отражающий зависимость отношения правдоподобия от значения признака у обследуемого. По графику находят соответствующую результату теста величину отношения правдоподобия, умножают на априорные шансы и получают значение апостериорных.

Правдоподобие – величина вероятностной природы, однако имеет ряд смысловых отличий от условной вероятности. Понятие вероятности связано скорее с дедуктивным выводом, мы сравниваем вероятности ряда фактов при условии некоторой одной гипотезы. Правдоподобие же связано с индуктивным

выводом, мы сравниваем вероятности одного и того же факта при условии ряда гипотез.

### 2.2.3. Согласие результатов исследования

Согласие результатов повторных исследований одним методом, результатов применения разных методов, согласие мнений специалистов может быть оценено различными способами.

Результаты тестов в принципе могут выражаться любым типом данных. Согласие между количественными признаками можно эффективно оценить с помощью ряда статистических методов оценки связи и проверки гипотез. Однако существуют и специфические методы оценки согласия, которые применяются чаще для качественных данных.

Индекс общего согласия в случае номинативных признаков – это доля объектов, одинаково квалифицированных разными методами, например, доля людей, мнения о которых у специалистов совпадают. Если из 100 человек 60 получили оценки "здоров" от всех специалистов, а 10 человек все эксперты посчитали больными, то индекс общего согласия равен 0,7. Индекс специфического согласия (о наличии болезни) равен 0,1.

Допустим, априорная вероятность заболевания составляет 2%, т.е. среди 1000 человек можно ожидать 20 больных. При вынесении всем обследуемым заключения "здоров" ошибка будет допущена только в 2 % случаев, общее согласие составит 98%. При изменении преваленса изменяется и степень согласия. Если бы в рассматриваемом примере были больны не 20, а 200 человек из 1000, то общее согласие при выставлении всем диагноза "здоров" составило бы уже 80%.

Допустим, что метод диагностики абсолютно неинформативен, и заключение “болен” устанавливается совершенно случайно 40 людям из 1000. Среди 20 больных правильно будет назван больным только один, а среди 980 здоровых 39 будут определены как больные, а 941 как здоровые. В результате общее согласие составит 942:1000 или 94,2%.

Ясно, что общее согласие может быть очень высоким при абсолютно неэффективной диагностике, и к этому показателю надо относиться осторожно. Ведь в ряде случаев мнения специалистов могут совпадать случайно. Если два врача случайным образом ставят диагноз половине обследованных, то заключения о наличии болезни случайно совпадут в 25% случаев. Случайное согласие оценивается как

$p_e = p_1 \cdot p_2 + (1 - p_1) \cdot (1 - p_2)$ , где  $p_1$  и  $p_2$  – частота положительных заключений двух врачей.

Общее согласие для большинства физикальных и инструментальных исследований составляет в среднем 60-70%, при рентгенологических исследованиях – до 97%. Однако эти данные относятся к профилактическим обследованиям, в которых доля больных невелика, и случайное согласие может быть очень высоким.

Чтобы оценить метод диагностики, надо выяснить его преимущество перед случайным вынесением диагноза, т.е. то, насколько общее согласие с истинным диагнозом превышает случайное. Поправка на случайное согласие введена в индексе каппа:

$$K = \frac{(p_o - p_e)}{(1 - p_e)}, \text{ где } p_o - \text{общее согласие, } p_e - \text{случайное.}$$

Можно оценить среднее квадратичное отклонение индекса каппа:



$$\sigma_K = \sqrt{\frac{p_o \cdot (1 - p_o)}{n \cdot (1 - p_e)^2}}$$

Показано, что величина каппа распределяется нормально в выборках из большой совокупности, поэтому для ее оценки можно применять параметрические подходы. Надежность индекса каппа определяется как  $Z = K / \sigma_K$ , граничные значения его соответствуют t-критерию.

Можно сравнить согласие в двух группах специалистов, использующих различные диагностические методы. Для оценки различий используется критерий:

$$Z = \frac{|K_1 - K_2|}{\sqrt{\sigma_{K_1}^2 + \sigma_{K_2}^2}}$$

Индекс каппа зависит от априорной вероятности заболевания, его лучше использовать при средних величинах преваленса.

Для оценки согласия используется также внутриклассовый коэффициент корреляции (ВКК). Он пригоден для оценки согласия между многими специалистами или разными способами исследования. Важное преимущество его – допустимость отсутствия обследования части пациентов некоторыми экспертами. В приведенной таблице строки соответствуют пациентам однородной по диагнозу группы, столбцы – экспертам (методам),  $X_{kj}$  – оценки состояния здоровья пациентов.

	1	...	Е	Всего
1	$X_{11}$	...	$X_{1E}$	$G_1$
2	$X_{21}$	...	$X_{2E}$	$G_2$
...	...			...
n	$X_{n1}$		$X_{nE}$	G

$G$  – сумма всех оценок,  $M$  – число оценок (если все эксперты обследовали всех пациентов, то  $M = nE$ ),  $J_k$  – число оценок каждого пациента (в пределе равно количеству экспертов). Общая дисперсия оценок специалистов:

$$S = \sum (X_{kj}^2 - \frac{G^2}{M}).$$

Дисперсия между оценками разных пациентов с одинаковыми диагнозами составляет

$$S_1 = \sum (\frac{G_k^2}{J_k} - \frac{G^2}{M}),$$

$$S_2 = S - S_1.$$

Внутриклассовый коэффициент корреляции определяется как  $\frac{|S_1 - S_2|}{S}$ . При этом 1-ВКК оценивает долю

общей дисперсии, обусловленную разногласиями между специалистами (расхождением методов). Достоверность ВКК

оценивается по F-критерию,  $F = \frac{S_1}{S_2}$ .

#### 2.2.4. Интегральные оценки эффективности теста

Двух операционных характеристик (чувствительности и специфичности) в принципе достаточно для описания диагностической эффективности теста. Однако использовать два показателя иногда не очень удобно, можно их совместить. Для этого применяется индекс диагностической эффективности, который представляет долю истинных результатов в общем количестве исследованных:

$$DE = \frac{PD + NH}{n}$$

Существуют и другие индексы, например, индекс относительного риска, который представляет отношение вероятности заболевания при положительном результате теста (прогностичность положительного результата) к его вероятности при отрицательном результате (ложность отрицательного результата):

$$RR = \frac{p(D|P)}{p(D|N)}$$

Оценка относительного риска в терминах чувствительности и специфичности будет выглядеть как

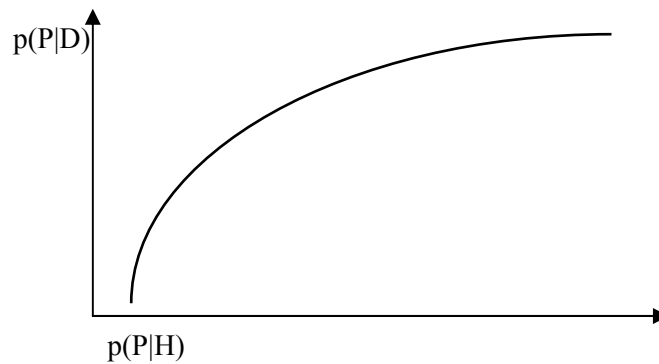
$$RR = \frac{S_e \cdot S_p}{(1 - S_e) \cdot (1 - S_p)}$$

При нормальном распределении и равных дисперсиях количественного признака в группах больных и здоровых можно использовать индекс обнаруживаемости:  $d = \frac{\bar{x}_D - \bar{x}_H}{\sigma_H}$ ,

т.е. разность средних значений, отнесенную к стандартному отклонению признака у здоровых. Если дисперсии признака неравны (а чаще при патологии дисперсия выше), то для этих условий предложены индекс Андерсона-Бахадура:

$$D = \frac{\bar{x}_D - \bar{x}_H}{\sigma_D + \sigma_H} \text{ и индекс Грея и Моргана: } d_{GM} = \frac{d}{\sqrt{\sigma_D \cdot \sigma_H}} .$$

Еще одним интегральным индексом диагностической эффективности является характеристическая кривая. Это кривая взаимосвязи количества истинно положительных и ложноположительных результатов (см. рисунок):



Например, сдвиг точки разделения повышает чувствительность теста, при этом растет число истинноположительных результатов, но параллельно растет и число ложноположительных. Эту динамику и отражает характеристическая кривая, которая может иметь разную форму и положение. Чем меньше ее изгиб, чем ближе она к прямой, тем менее эффективно диагностическое исследование, поскольку сдвиг точки разделения не приводит к изменению пропорции истинно и ложноположительных результатов. Это бывает в случае, если распределения диагностического признака в группе больных и здоровых близки.

Если результат теста *качественный*, характеристическую кривую можно построить следующими способами:

1. Получить оценки разных специалистов для одного массива экспериментальных данных. Мнения специалистов отличаются, поэтому будет получено несколько разных оценок соответствия истинных и ложных результатов, по которым можно построить часть кривой. Однако в случае близкой квалификации специалистов, их сходного опыта такой подход

может оказаться неэффективным, точки будут расположены близко к друг другу.

2. Повторно оценить одни и те же результаты с намеренным изменением подхода экспертов от оптимистического к пессимистическому.

3. Перейти от *качественных* оценок к *ординальным*, т.е. в порядковую шкалу: ранжировать случаи по группам, например: “определенно норма”, “возможно норма”, “сомнительно”, “возможно патология”, “определенно патология”. Точку разделения можно установить между каждым из рангов, считая положительными все случаи выше этой точки, и вычислить операционные характеристики. Таким способом можно получить несколько точек для характеристической кривой, не прибегая к независимой оценке нескольких экспертов.

При *количественных* данных изучаемого теста построение характеристической кривой упрощается. Сдвиг точки разделения приводит к изменению операционных характеристик, таким образом мы можем оценить пары операционных характеристик и построить кривую. Если результаты референтного метода также выражаются количественно, то можно изменять точку разделения и по референтному тесту, тем самым увеличивая надежность характеристической кривой.

Характеристическую кривую можно использовать и для оценки квалификации. С повышением квалификации специалиста характеристическая кривая, описывающая результаты его работы, лежит все выше. Для методов, результаты которых описываются на основе простых критериев, выявить различия между опытными и начинающими врачами

трудно. Практически нет различий между характеристическими кривыми, описывающими работу педиатров разной квалификации по оценке посевов микрофлоры из глотки. Однако эти различия очень значительны при оценке ЭКГ и ЭЭГ.

### **2.2.5. Операционные характеристики теста и преваленс заболевания**

Одно из направлений развития профилактической медицины – раннее выявление заболеваний, организация программ скрининга, т.е. обследование людей, еще не обратившихся к врачу. Особенность этого типа исследований – низкий преваленс заболеваний в обследуемой группе. В этих условиях даже наиболее эффективные методы не могут с высокой вероятностью свидетельствовать о наличии заболевания, поэтому методы скрининга можно рассматривать только как первоначальные. К ним прежде всего предъявляются требования высокой чувствительности, а также дешевизны, безвредности, приемлемости для обследуемых. Такие тесты называются идентификаторами. Отрицательный результат этих методов высоко прогностичен, при этом пропускается мало случаев заболевания. Положительный результат обнаруживается практически у всех больных и части здоровых, прогностичность его невысока, но значительно выше априорной вероятности. Последующее более сложное и дорогое обследование проводится меньшему кругу лиц с большим эффектом (с большей прогностичностью).

Допустим, проводится скрининг сахарного диабета по содержанию сахара в крови в популяции 10000 человек. При преваленсе 2% в данной популяции ожидается 9800 здоровых и 200 больных диабетом. В точке разделения 9,9 ммоль/л

чувствительность метода составляет 22,5%, а специфичность – 99,8%. При таких характеристиках среди 200 больных тест будет положителен у 45, а отрицателен у 155. Из 9800 здоровых тест будет положителен у 20 человек. Прогностичность положительного результата будет достаточно высока (69%), но при этом 78% больных останутся невыявленными. Этот уровень скрининга нельзя признать удовлетворительным.

В точке деления 8,8 ммоль/л чувствительность теста составит 55%, а специфичность – 98%. Будут выявлены 110 больных из 200, но прогностичность положительного результата при этом снизится до 36% из-за увеличения числа ложноположительных результатов.

В точке деления 5,5 ммоль/л чувствительность составит 98%, специфичность – 48%. Подавляющую часть положительных результатов составят ложноположительные (5096 из 5292), но при этом мы выявим 99% больных.

При применении низкоспецифичных методов скрининга возникает проблема большого количества ложноположительных результатов, которые вызывают у обследуемых серьезные переживания в связи с подозрением на болезнь. В отличие от болезни, этот синдром возникает ятрогенно, и врачи несут за него ответственность. Кроме того, большое количество положительных результатов приводит к загруженности подразделений, выполняющих углубленное обследование. Проблема невелика, если существуют доступные методы углубленного обследования, оно дешево, и для этого есть соответствующие ресурсы времени и персонала. Если же ресурсов не хватает, то программа скрининга дискредитируется. В этом случае надо изменить уровень скрининга или сменить метод, чтобы количество положительных результатов

соответствовало возможностям обследования. Таким образом, для достижения основной цели скрининга необходим баланс между высокой чувствительностью метода и возможностями обработки большого количества ложноположительных результатов.

Примером метода, адекватного целям скрининга, является баллистокардиография, характеризующаяся высокой чувствительностью, низкой специфичностью, дешевизной. Этот метод выявляет значительную долю лиц с начальными отклонениями в работе сердечно-сосудистой системы. Напротив, ЭКГ покоя – высокоспецифичный метод с низкой чувствительностью, и его применение при скрининге нецелесообразно.

Высокий преваленс заболевания характерен для исследований групп лиц с подозрением на наличие заболевания, в том числе сформированных по итогам программ скрининга. На этом этапе круг рассматриваемых болезней сужается, стоит задача доказать уже не отсутствие, а наличие заболевания. Для этого нужны высокоспецифичные тесты, называемые дискриминаторами – их положительный результат надежно свидетельствует о наличии заболевания.

Практически операционные характеристики определяются на ограниченной выборке больных с верифицированным диагнозом. Поскольку референтные тесты обычно трудоемки и дороги, то в таких исследованиях число лиц, не имеющих изучаемого заболевания, оказывается минимальным. Поэтому преваленс при определении операционных характеристик теста обычно выше, чем в практической работе. Это приводит к систематической



переоценке чувствительности и недооценке специфичности тестов.

Примером могут служить операционные характеристики ЭКГ с максимальной физической нагрузкой, которые оценивались в сопоставлении с коронарографией. Проведение коронарографии здоровым людям практически невозможно, поэтому оценки получают по результатам обследования лиц с подозрением на ИБС, у которых преваленс ИБС обычно более 70%. Полученные операционные характеристики используются затем в расчетах для групп со значительно более низким преваленсом. Следовательно, ЭКГ с физической нагрузкой в профилактических обследованиях даст меньше ложноположительных результатов, чем ожидается из оценки ее специфичности.

Прогностичность результата определяется преваленсом и операционными характеристиками. В широком диапазоне чувствительности и специфичности прогностичность положительного результата зависит в основном от специфичности и тем выше, чем выше преваленс. Поэтому при скрининге прогностичность положительных результатов низка, но даже небольшое повышение преваленса приводит к ее резкому увеличению. Напротив, прогностичность отрицательного результата при низком преваленсе высока, мало зависит от операционных характеристик теста и снижается только при очень высоком преваленсе.

При сдвиге точки разделения влево число ложноотрицательных результатов будет уменьшаться, но значительно быстрее будет расти число ложноположительных, поэтому диагностическая эффективность теста будет снижаться. При очень низких величинах исследуемого параметра, при

которых больные и здоровые встречаются редко, правильно классифицироваться будут только больные. Диагностическая эффективность станет равной преваленсу,  $DЭ=p(D)$ . При сдвиге точки разделения вправо, где обнаружение и здоровых, и больных маловероятно, правильно будут классифицироваться только здоровые,  $DЭ=1-p(D)$ .

Это означает, что при профилактических обследованиях (низком преваленсе) сдвиг точки разделения вправо от оптимума не приводит к очень выраженному увеличению суммарного числа ошибок. Напротив, сдвиг точки разделения влево приводит к значительному снижению диагностической эффективности. Иная ситуация при диагностике в условиях высокого преваленса: сдвиг точки разделения вправо приводит к весьма нежелательным последствиям, быстро растет общее число ошибок и еще быстрее – число ложноотрицательных результатов.

В случае наличия у признака не точки разделения, а референтного интервала, наблюдаются те же закономерности. Если внутри интервала повышена вероятность обнаружения здоровых, то его сужение равнозначно сдвигу точки разделения в область значений здоровых, а расширение – сдвигу в область значений больных.

Разность между вероятностью заболевания при положительном и отрицательном результатах теста можно рассматривать как меру информации, получаемой при проведении исследования. Наиболее информативными тесты оказываются при средних величинах преваленса. Использование теста с высокой специфичностью приводит к преимущественному возрастанию вероятности заболевания при положительном результате, отрицательный результат не

сопровождается существенным снижением вероятности болезни. Обратная ситуация наблюдается при использовании теста с высокой чувствительностью, при котором происходит преимущественное снижение вероятности заболевания при отрицательном результате, а положительный результат существенно не увеличивает вероятность болезни.

#### **2.2.6. Сложности реального применения оценок эффективности теста**

Каждая патология имеет свою динамику, и диагностика заболеваний в развернутой стадии болезни обычно проще, чем в ее начале. Не всегда симптомы имеют меньшую выраженность на начальной стадии заболевания, могут наблюдаться особые симптомы, другие соотношения симптомов. Эффективность теста может быть различна в различные фазы заболевания. Как и для референтных величин, определение операционных характеристик теста лучше производить для каждой стадии болезни. Можно рекомендовать использовать диагностические методы только на определенных стадиях патологии, либо менять точки деления результатов в зависимости от фазы болезни.

Видимо, случаи, выявляемые референтным методом (набором методов), чем-то отличаются от невыявляемых случаев. Проверка новых методов производится в сравнении с референтным, поэтому изучаемым тестом будут чаще выявляться те же случаи, что и при использовании референтного метода, и не выявляться те же, что не выявляет референтный. Вследствие этого можно ожидать завышенных оценок чувствительности и специфичности метода относительно истинной распространенности заболевания.

Если новый высокоэффективный тест сравнивается с не абсолютно специфичным референтным тестом, то вновь выявленные случаи заболевания будут считаться ложноположительными. Так, при ультразвуковом исследовании больных желчекаменной болезнью были выявлены камни, не определенные при холецистографии, но действительно обнаруженные в процессе операции.

Методики оценки операционных характеристик разработаны для случая независимости изучаемого и референтного тестов, но мы не всегда можем быть в этом полностью уверены. Если изучаемый тест используется при установлении клинического (референтного) диагноза, его операционные характеристики будут завышены: положительный результат будет побуждать врача к продолжению исследования и увеличивать вероятность установления диагноза, отрицательный – к отказу от дальнейшего поиска. Этого можно избежать, если изучаемый тест – новый и не стал еще привычным и обязательным для врачей. Чаще обязательным является референтный тест и если изучаемый тест проводится, когда уже известны результаты референтного, оценки операционных характеристик могут быть произвольно завышены. Например, клинические данные оказывают большое влияние на оценку рентгенограммы: зная клинику, рентгенолог увидит другой результат исследования.

Получение и применение оценок эффективности тестов иногда затрудняет отсутствие данных об отрицательных результатах исследования – как истинных, так и ложных. В силу дороговизны либо этической неприемлемости дальнейшего углубленного исследования оно может просто не проводиться лицам без веских на то оснований. Например, при

отрицательном результате скрининга на рак предстательной железы по уровню простат-специфического антигена крайне неприятная для пациента биопсия, являющаяся референтным методом, не проводится.

Референтный тест может просто отсутствовать. Если нет надежного референтного теста, то истинную оценку индивида можно представить как результат применения неопределенно большого количества параллельных методов, или многократного использования одного метода. Например, в отсутствие референтного теста был проведен расчет эффективности скрининга населения на туберкулез легких с помощью флюорографии. Была проведена независимая оценка флюорограмм десятью специалистами. Если хотя бы один из них считал случай подозрительным, изготавливали снимки большего формата, которые независимо оценивали шесть специалистов. Если хотя бы один из них признавал случай положительным, снимок передавался на консилиум из семи рентгенологов и пульмонологов, с тайным голосованием. Рентгенологически положительными считали случаи, признанные большинством, и после этого выполняли углубленное разностороннее обследование. Окончательная оценка выносилась на основании всех данных, включая эффективность лечения – так была выделена группа больных, остальные испытуемые отнесены в группу здоровых.

Отсутствие референтного теста – далеко не редкий случай. Так могут рассматриваться все ситуации, когда существующие классификации неубедительны, методы исследования не имеют четких критериев эффективности, рассматривается новое заболевание, диагностические критерии для которого еще не сформированы. При этом нет другого пути,

кроме последовательной, поэтапной индукции: использование строгих методов таксономии, сопоставление результатов с данными клинических наблюдений, отдаленными последствиями, новые попытки классификации. Фактически это путь, который в своем развитии проходит медицина в целом.

### **2.2.7. Сравнение эффективности диагностических исследований**

Прежде всего, возникает вопрос о необходимости применения специальных методов для сравнения эффективности диагностических тестов. Может быть, существующих статистических критериев достаточно для их сравнения?

Критерии Стьюдента, Колмогорова, хи-квадрат, коэффициент корреляции предполагают равное значение чувствительности и специфичности теста или одинаковую опасность ложноположительных и ложноотрицательных результатов. Их целесообразно применять на предварительных этапах исследования, а корректное сравнение диагностической эффективности тестов равнозначно сравнению их операционных характеристик. Лучшим можно признать тест, имеющий при данной чувствительности выше специфичность, либо при данной специфичности выше чувствительность. Можно сравнивать полученные результаты с литературными данными или с результатами измерений на разных группах больных. Но часто не совпадают ни чувствительность, ни специфичность теста. Кроме того, условия получения операционных характеристик могут отличаться, например спектром заболевания в исследуемой группе.

Корректнее применить два сравниваемых теста к одним и тем же группам больных и здоровых. Чтобы сравнить

чувствительность двух тестов, необходимо знать количество положительных и отрицательных результатов по каждому из них в одной и той же выборке больных:

2-й тест

1-й тест	+	-	Итого
+	a	b	a+b
-	c	d	c+d
Итого	a+c	b+d	n

Чувствительность первого теста составит  $Se_1 = (a + b)/n$ , второго –  $Se_2 = (a + c)/n$ .

Чтобы сравнить специфичность методов, необходимы аналогичные данные о здоровых, т.е. о тех лицах, у которых отсутствие заболевания подтверждено референтным методом. Специфичность методов определяется как  $Sp_1 = (c+d)/n$ ,  $Sp_2 = (b+d)/n$ . Достоверность различий между операционными характеристиками можно оценить с помощью t-критерия для сравнения частот:

$$t = \frac{|q - p|}{\sqrt{m_q^2 + m_p^2}}, \text{ где ошибка } m_{p(q)} = \sqrt{\frac{p \cdot (1 - p)}{n - 1}}, p \text{ и } q -$$

сравниваемые операционные характеристики.

Данный подход применяется при качественном результате тестов. В случае количественного результата можно изменить точку разделения, подобрав условия, когда чувствительность или специфичность двух тестов совпадут, а затем просто сравнить вторую операционную характеристику.

Для сравнительной оценки эффективности тестов можно также использовать сравнение площадей под характеристическими кривыми. Теоретически площадь под кривой может меняться от 0 до 1, но диагностически полезные

тесты характеризуются кривыми, расположенными выше диагонали, под которыми площадь меняется от 0,5 до 1. Сравнить площади можно по приведенной выше формуле t-критерия.

### **2.2.8. Ожидаемая полезность диагностического исследования**

В медицинской диагностике, как и в обыденной жизни, польза и ущерб от действий могут и должны быть количественно оценены. Эти цены складываются из показателей здоровья и стоимости.

Оценки состояния здоровья в принципе недостаточно надежны, наиболее объективно здоровье группы лиц можно оценить по смертности (выживаемости). Но показатель смертности не учитывает другие отрицательные стороны болезни – страдания, снижение работоспособности, уродующий или социально неприемлемый эффект. Эти факторы могут определить отказ больного от лечения, эффективного по выживаемости, и выбор другого, менее эффективного, но более приемлемого. В показатели здоровья входит также социальная опасность заболевания, например инфекционного, в этом случае очень высока цена ложноотрицательного результата.

Цены по показателям стоимости включают прямые затраты больного, его семьи и государства, а также косвенные затраты, связанные с потерей больным трудоспособности и подготовкой нового работника. Эти косвенные потери могут быть очень значительны.

Ожидаемую полезность диагностического теста можно представить как сумму выигрышей и потерь, связанных с его проведением:

$$V = C_t + PD * V_{pd} + NH * V_{nh} + PH * V_{ph} + ND * V_{nd}$$



где  $C_t$  – цена теста, т. е. риск и затраты, связанные с выполнением самого теста, независимо от его результата,

PD – количество истинноположительных результатов,

NH – количество истинноотрицательных результатов,

PH – количество ложноположительных результатов,

ND – количество ложноотрицательных результатов,

$V_{pd}, V_{nh}, V_{ph}, V_{nd}$  – цены четырех типов соответствующих результатов.

В практике количественно определить цены результатов можно только экспертно. Взгляд на патологию, как процесс, который, раз начавшись, продолжает развиваться и приводит к неблагоприятным последствиям, а раннее вмешательство позволяет эффективно лечить его, сформировался в борьбе с инфекционной патологией. В этом случае действительно лучше поставить ложноположительный диагноз сотням людей, чем ложноотрицательный одному. Для неинфекционной патологии это не столь бесспорно. Ложноположительный диагноз может быть основанием ненужной операции в хирургии, химиотерапии в онкологии, социальных ограничений в психиатрии, длительного профилактического лечения “донозологических” стадий.

Мало внимания обычно уделяется отношению пациента к диагнозу. Предполагается, что его удовлетворяют методы, избранные исходя из “объективных” критериев максимальной продолжительности жизни и т.п. Но при этом остается вопрос: соответствует ли, по мнению пациента, выигрыш в продолжительности жизни риску гибели при лечении. Ближайшие годы оцениваются человеком выше, чем отдаленные. 50% больных раком считают эквивалентными риску немедленной гибели как минимум 3 года жизни и 80%

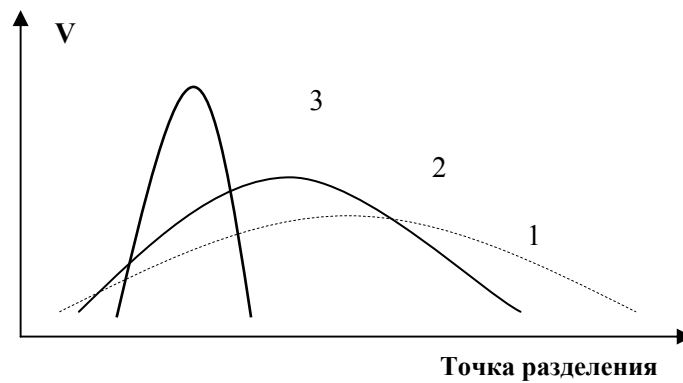
больных – 7 лет. Для большей части больных лучше жить меньше, но не умереть во время операции. Отношение конкретного пациента к возможности разного результата диагностики и лечения также может быть учтено в ценах результатов.

В качестве примера рассмотрим 3 варианта соотношения цен результатов. Истинные результаты имеют положительную цену, ложные – отрицательную:

В а р и а н т ы

	1	2	3
NH	1	1	1
PD	1	2	2
PH	-1	-2	-5
ND	-1	-10	-50
$C=abs(V_{ph}/V_{nd})$	1	0,2	0,1

Первый вариант цен достаточно условен, второй и третий более реалистичны. Когда цены результатов невелики, ожидаемая полезность теста меняется мало при изменении точки разделения теста, т.е. количества результатов разных типов (график 1, см. рис.).



При относительном росте цены ложноотрицательного результата (графики 2, 3) происходят увеличение максимально возможной ожидаемой полезности и смещение оптимальной точки разделения в сторону значений, характерных для здоровых. Одновременно сужается допустимый интервал изменений точки разделения. При смещении точки разделения в область значений, характерных для больных, ожидаемая полезность резко падает. Такая ситуация характерна для опасных, инфекционных заболеваний.

Уравнение для ожидаемой полезности можно записать и так:

$$V = p(P | D) - Y \cdot p(P | H), \text{ где}$$

$$Y = \frac{p(H) \cdot (V_{nh} + V_{ph})}{p(D) \cdot (V_{pd} + V_{nd})}$$

Величина  $Y$  взвешивает, исходя из цен, соотношение истинно- и ложноположительных результатов, она равна отношению правдоподобия, соответствующему оптимальному положению точки разделения.

Если цены результатов неизвестны, можно сделать грубое допущение об их равенстве. В этом случае  $Y = p(H)/p(D)$ ,

т.е. отношению, обратному априорным шансам заболевания.

Тогда:

$$V = p(P|D) - \frac{p(H) \cdot p(P|H)}{p(D)} = \frac{PD}{D} - \frac{H}{D} \cdot \frac{PH}{H} = \frac{PD - PH}{D}$$

В стремлении к максимуму полезности мы приходим к необходимости максимизировать разность  $PD - PH = PD - H + NH$ . Поскольку  $H$  не меняется, то максимизируется сумма  $PD + NH$ . Эта сумма, отнесенная к числу обследованных, является индексом диагностической эффективности, который и определяет положение точки разделения при равенстве цен результатов.

Более реалистичным будет допущение, что цены истинноположительных и истинноотрицательных результатов равны и могут быть условно обозначены единицей полезности. Потери же от получения ложноположительного и ложноотрицательного результатов различаются, тогда:

$$Y = \frac{p(H)}{p(D)} \cdot \frac{V_{ph}}{V_{nd}}, \quad \text{а} \quad \text{ожидаемая} \quad \text{полезность}$$

$$V = \frac{PD}{D} - \frac{PH}{D} \cdot \frac{V_{ph}}{V_{nd}}$$

При дешевом и безопасном тесте, эффективном лечении и важном (опасном) заболевании отношение  $V_{ph}/V_{nd}$  мало. В этом случае надо уменьшать количество ложноотрицательных результатов. При дорогом и опасном обследовании, легком заболевании отношение цен велико – при этом надо уменьшать количество ложноположительных результатов.

### 2.2.9. Влияние цен методов и результатов на выбор врачебной стратегии

Чтобы выбрать метод и стратегию исследования и лечения, надо учесть ряд цен. Проще всего учесть цену самого исследования. Эффективность метода – понятие относительное, ее надо сравнивать с эффективностью референтного метода. Например, при диагностике ИБС референтным методом может служить коронарография. Изучаемыми методами являлись ЭКГ при максимальной физической нагрузке, флюороскопия сердца (выявление кальцификации коронарных сосудов), сцинтиграфия с радиоактивным таллием.

Естественный вывод – наиболее эффективна комбинация всех трех методов, но вместе с эффективностью растет и цена исследования:

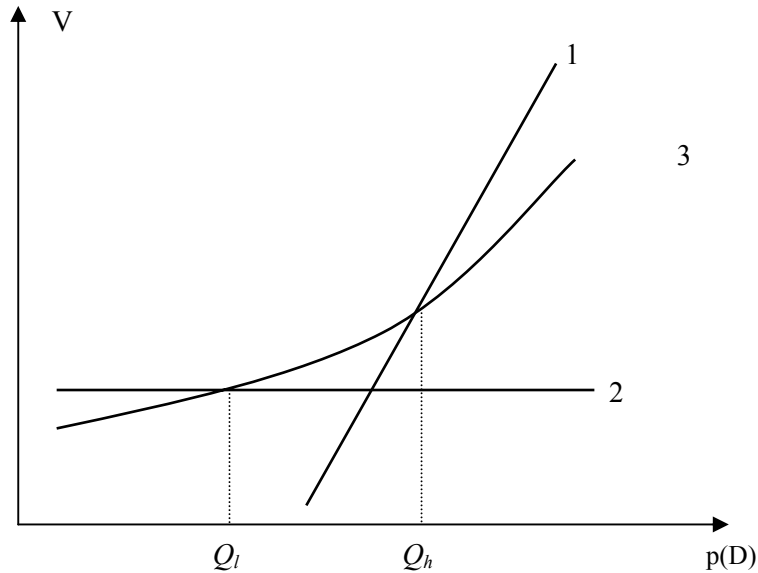
	Коронаро- графия	ЭКГ	Флюоро- скопия	Сцинти- графия
Относительная цена	1,0	0,087	0,033	0,227
Относительная эффективность	1,0	0,263	0,279	0,404
Соотношение цена / эффективность	1,0	0,331	0,118	0,562

Можно сделать вывод, что высокая относительная эффективность сцинтиграфии не пропорциональна ее цене – отношение цена / эффективность для этого метода уступает флюорокопии и ЭКГ.

При выборе стратегии обследования и плана лечения необходимо учитывать не только цены методов, цены

результатов, но и преваленс заболевания. Пусть в нашем распоряжении есть три варианта лечебной стратегии (см. рис.):

- 1 – применить (изменить) лечение без дополнительного исследования,
- 2 – ничего не менять,
- 3 – провести тест и действовать в соответствии с его результатами.



При выборе первого варианта стратегии при высоком преваленсе можно получить самые лучшие результаты. Лечение назначается без задержки, отсутствуют затраты на тест и связанные с ним опасности. При выборе второго варианта прироста полезности нет, однако нет и затрат. Эта тактика имеет преимущества при низком преваленсе, когда тестирование и тем более лечение без тестирования нецелесообразны. Третий вариант связан с дополнительными затратами, поэтому при

высоком преваленсе прирост полезности у него ниже, чем в первом варианте, при низком преваленсе затрат больше, зато при средних значениях преваленса эта тактика предпочтительней.

Возникает вопрос, какие значения преваленса можно считать средними, т.е. как определить границы преваленса, в которых тестирование оправдано.

В случае *альтернативного результата теста* минимальный преваленс, при котором целесообразно тестирование:

$$Q_l = \frac{C_w \cdot PH + C_t}{C_w \cdot PH + B_w \cdot PD}, \quad \text{где } C_w = |V_{1H} - V_{2H}| -$$

разность ожидаемой полезности при первой и второй стратегиях в группе здоровых,  $B_w = |V_{1D} - V_{2D}|$  – то же в группе больных.

Максимальный преваленс, при котором целесообразно тестирование:

$$Q_h = \frac{C_w \cdot NH - C_t}{C_w \cdot NH + B_w \cdot ND}.$$

Если цена исследования очень высока, то оно нецелесообразно при любом преваленсе. Пороговая цена исследования:

$$C_t = \frac{B_w \cdot C_w \cdot (PD - NH)}{B_w + C_w}.$$

### **2.3. Принятие решений**

Подходы к принятию решений существенно различаются в зависимости от того, известны ли последствия выбора альтернатив и можно ли оценить их вероятность.

### 2.3.1. Принятие решений в условиях определенности

В условиях определенности последствия каждой альтернативы точно известны. В этой ситуации чаще всего используется критериальный подход. Основное предположение этого подхода заключается в том, что каждую альтернативу можно оценить с помощью некоторых численных критериев. Это могут быть критерий качества, функция предпочтения, функция полезности, целевая функция. Выбор альтернативы заключается в сравнении значений критериев. Метод решения данной задачи (способ отыскание экстремума критерия) зависит от множества альтернатив и характера критерия. Примером могут служить рассмотренные в предыдущем разделе понятия ожидаемой полезности и цен результатов.

Ограничения данного подхода состоят в редко встречающейся ситуации полной определенности последствий выбора и сложности использования единственного критерия. На практике чаще используются несколько различных критериев, и крайне редко одна альтернатива является лучшей по каждому из них. В этой ситуации применяются следующие подходы:

- Если критерии выбора равнозначны, то выбор альтернативы осуществляется по количеству «лучших» критериев.
- Метод уступок означает возможность допустимого снижения значения каждого критерия, начиная с самого важного, при максимизации следующих по важности критериев.
- Возможен отказ от идеи поиска лучшей альтернативы. Все худшие по всем критериям альтернативы отбрасываются, а оставшиеся формируют множество несравнимых (т.е. не все критерии лучше или хуже прочих) альтернатив, называемое множеством Парето.



Часто используется также сведение многокритериальной задачи к однокритериальной:

- Выделение одного основного критерия и нахождение его условного экстремума в предположении, что остальные критерии остаются на заданных уровнях либо не превышают определенный предел.
- Введение нового критерия как скалярной функции вектора множества критериев  $n$ :  
 $F(x) = F(q_1(x), q_2(x), \dots, q_n(x))$ . Обычно произведения каждого критерия на определенный коэффициент суммируются (аддитивная функция) или умножаются (мультипликативная функция). Задача выбора сводится к поиску альтернативы с максимальным значением нового критерия. Следует отметить, что небольшое изменение коэффициентов критерия может привести к принципиально иному выбору альтернативы. Два примера сведения многокритериальной задачи к однокритериальной приведены ниже.

#### *1. Линейная дискриминантная функция*

Этот широкораспространенный метод математической статистики позволяет спроецировать многомерные данные на новую ось, заменив сравнение многомерных распределений сравнением одномерных. Например, для двух переменных (хотя теоретически количество исследуемых признаков не ограничено) дискриминантная функция  $D = A + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2$ , где  $a_{1,2}$  – дискриминантные коэффициенты,  $x_{1,2}$  – признаки,  $A$  – константа.

Простейший способ расчета дискриминантного коэффициента по признаку  $x$  для диагнозов  $D_1, D_2$ :

$$a = \frac{\bar{x}(D_1) - \bar{x}(D_2)}{\sigma^2}, \text{ где}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_i^N [x_i(D_1) - \bar{x}(D_1)]^2 + \sum_j^M [x_j(D_2) - \bar{x}(D_2)]^2}{N + M - 2}$$

После расчета дискриминатора  $D$  он сравнивается с определенным порогом:

$$X_0 = 1/2 \cdot \sum_i^p a_i \cdot [\bar{x}_i(D_1) + \bar{x}_i(D_2)]$$

Таким образом осуществляется переход от многокритериального решения к однокритериальному. Строго говоря, этот метод применим только к непрерывным, нормально распределенным количественным переменным с близкими дисперсиями, он может использоваться только при линейных связях между признаками. Но даже существенное отклонение распределения признаков от нормального значительно не влияет на эффективность метода. Линейная дискриминантная функция имеет преимущества при малом количестве диагнозов и умеренном числе признаков (до 50). Достоинствами метода являются также его простота и легкая интерпретируемость.

У метода есть и недостатки, например жесткая связь со списком признаков. Численные значения дискриминантных коэффициентов зависят от набора признаков. При исключении хотя бы одного признака не только уменьшается количество коэффициентов, но все остальные коэффициенты меняют свои значения. Отсутствие данных – нередкий случай в клинической практике из-за дорогих, опасных методов исследования, отсутствия анамнестических сведений, отсутствия родственников и т.п.

## 2. Обобщенный показатель тяжести заболевания

Можно считать, что тяжесть заболевания  $X$  объективно существует и является  $n$ -мерной непрерывной величиной. Тяжесть состояния больного мы описываем вектором, компонентами которого являются клинические и лабораторные показатели:  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . В ходе диагностики в результате измерения этого вектора мы определяем  $S$  – дискретную величину, оценку состояния больного.  $S$  устанавливается врачом и имеет смысл для конкретных заболеваний (степень тяжести, стадии течения).

Векторное представление тяжести состояния затрудняет понимание статуса и анализ динамики заболевания. Введение обобщенного индекса тяжести заболевания эквивалентно переводу векторной величины в скалярную, что значительно упрощает работу врача. Обобщенным показателем тяжести будет являться функция  $f(x)$ , с минимальной ошибкой предсказывающая значение  $S$  по вектору  $X$ .

Для этого можно минимизировать функционал  $I = [S_i - f_i(x)]^2$ , где  $S$  – оценка состояния больных в  $i$ -й группе,  $f(x) = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n$ , т.е. сумма произведений значений признаков вектора  $X$  на специально подобранные коэффициенты  $a_i$ . Методически этот способ близок построению линейной дискриминантной функции. Функционал  $I$  минимален, если для всех  $S$   $f(x)=S$ . Мы можем сформировать группы больных с одинаковой степенью тяжести  $S$ , измерить у больных признаки  $x$  и найти значения коэффициентов  $a$ , при которых функционал минимизируется.

$f(x)$  является количественным признаком, в отличие от большинства симптомов, стадий болезни и т.п. Для изучения

динамики заболевания удобно использовать отношение  $f/f_0$ ,

где  $f_0$  – значение обобщенного показателя тяжести в начальный момент, например при поступлении в стационар. Можно построить доверительный интервал динамики тяжести заболевания, что позволяет легко определить отклонения от типичного течения болезни. Этот метод удобно также использовать для сравнения методов лечения, оценивать необходимость коррекции лечения по отклонению показателя от «эталонной» динамики.

При построении обобщенного показателя тяжести надо учитывать особенность лабораторных показателей – их нелинейную динамику при тяжелых формах патологии. Допустим, существует 4 стадии болезни ( $S=1,2,3,4$ ). Тогда обобщенный индекс тяжести по лабораторным показателям можно оценить как:

$$f(x) = A(s) \cdot \sum_i^n a_i \cdot x_i + B(s) \cdot \sum_i^n \frac{a_i}{x_i},$$

где  $A(s)=1, B(s)=0$  при  $s=1,2$ ;  $A(s)=0, B(s)=1$  при  $s=3,4$ .

### 2.3.2. Принятие решений в условиях статистической неопределенности

Выбор в условиях статистической неопределенности характеризуется тем, что в реализации последствий выбора участвуют неконтролируемые факторы. Этот тип выбора включает формулировку и проверку гипотез и поддерживается многочисленными статистическими методами. Применяя мощный аппарат математической статистики, надо помнить, что:

1. Статистические выводы могут иметь высокую надежность и точность, но почти никогда не бывают абсолютно достоверными.
2. Обрабатываемые данные могут быть по своей природе нестатистичны, т.е. вариации при их измерении неслучайны.
3. Используемые методы могут не соответствовать природе данных (например, дисперсионный анализ при негауссовом распределении признака).
4. Интерпретация результатов статистической обработки без учета особенностей предметной области может быть неверна (например, переход от статистических корреляций и ассоциаций к причинно-следственной интерпретации).

Для поддержки решений в медицине в условиях статистической неопределенности применяются три основные группы математических методов:

1. Собственно статистические методы (корреляционный, регрессионный, дисперсионный, факторный анализы).
2. Методы распознавания образов (многомерной статистики).
3. Вероятностные методы.

Первые две группы методов не имеют особенностей, связанных со спецификой принятия решений в медицине. Кратко остановимся на методах последней группы.

#### *1. Вероятностные методы*

Каждый симптом может с некоторой вероятностью встречаться при ряде заболеваний, патогномичные симптомы – крайняя редкость. Задачу диагностики можно сформулировать как определение вероятности некоторого состояния при условии наличия некоторых симптомов:  $p(D|S_1, S_2, \dots, S_i)$ . Именно такую задачу осознанно или интуитивно решает врач. При этом он знает (из учебников, лекций, собственной практики)

вероятность этих симптомов при определенных состояниях  $p(S|D)$ .

Строго эта задача решается по формуле Байеса, которая является способом расчета апостериорной вероятности диагноза при известных априорной вероятности диагноза и условной вероятности наличия симптома при данном диагнозе:  $p(D|S)=p(D) \cdot p(S|D)$ . Если априорную вероятность  $p(D)$  можно оценить по данным медицинской статистики, то условные вероятности определить сложнее. Наиболее часто предполагается, что проявление у больного изучаемых симптомов статистически независимо. Тогда условная вероятность симптомокомплекса  $S$  равна произведению условных вероятностей каждого симптома, а их можно оценить по частоте встречаемости при разных заболеваниях:  $p(S_i|D_j)$ . Вероятность заболевания  $D_j$  из некоторой группы заболеваний  $D$  при выявлении симптомокомплекса  $S$ :

$$p(D_j | S) = \frac{p(D_j) \cdot \prod_i p(S_i | D_j)}{\sum_j p(D_j) \cdot \prod_i p(S_i | D_j)}$$

Если врач не может точно определить наличие симптомов, но в состоянии оценить вероятности их наличия у больного  $a_i$ , то:

$$p(D_j | a_1, \dots, a_n) = \frac{p(D_j) \cdot \prod_i [a_i \cdot p(S_i | D_j) + (1 - a_i) \cdot (1 - p(S_i | D_j))]}{\sum_j p(D_j) \cdot \prod_i [a_i \cdot p(S_i | D_j) + (1 - a_i) \cdot (1 - p(S_i | D_j))]}$$

Формулу Байеса можно прямо записать через значения чувствительности и неспецифичности, а искомая апостериорная вероятность эквивалентна прогностичности теста:

$$p(D | P) = \frac{p(D) \cdot Se}{p(D) \cdot Se + [1 - p(D)] \cdot (1 - Sp)}$$

По аналогичной формуле можно рассчитать вероятность болезни при отрицательном результате теста:

$$p(D | N) = \frac{p(D) \cdot (1 - Se)}{p(D) \cdot (1 - Se) + [1 - p(D)] \cdot Sp}$$

Препятствием к прямому широкому использованию формулы Байеса является часто наблюдаемая патогенетическая связь симптомов, отражающаяся в их статистической связи. Иногда применяется следующее эмпирическое правило: при корреляции между симптомами менее 0.4 зависимость между ними игнорируется, при статистически достоверной корреляции больше 0.8 один из признаков необходимо исключить. В случае промежуточных значений коэффициента корреляции можно попробовать объединить эти признаки, сформировать двумерный признак путем перебора сочетаний коррелированных признаков, ввести линейную комбинацию двух признаков и т.п.

Последовательный статистический анализ Вальда – второй из широко применяемых в медицине вероятностных методов. Автором метода была предложена так называемая однородная процедура, имеющая целью отнесение группы объектов к какому-либо классу на основе многократного измерения одного признака в этой группе. Эта процедура была модифицирована Е.В.Гублером и А.А.Генкиным и названа неоднородной. Модификация состоит в измерении ряда признаков у одного объекта (симптомов у больного) и имеет целью отнесение объекта к классу. Неоднородная процедура впервые была применена для диагностики ожоговой болезни. В ходе последовательного получения информации о

характеристиках объекта (симптомах, синдромах) достигается выбранный уровень вероятности диагноза. Отличие этого метода от формулы Байеса состоит в зависимости решения об окончании обследования от результатов проведенных тестов.

Пусть имеются основания к постановке больному одного из двух диагнозов:  $D_1$  или  $D_2$ . Допустим, вначале проведено обследование больного на предмет поиска симптома  $S_1$ , и этот симптом обнаружен. Если при заболевании  $D_2$  симптом  $S_1$  встречается значительно чаще (нам известны соответствующие условные вероятности), то можно сделать вывод о наличии  $D_2$ . Например,  $D_2$  принимается, если:

$$\frac{p(S_1 | D_2)}{p(S_1 | D_1)} > A, \text{ где } A - \text{ порог, превышение которого}$$

необходимо для принятия решения. Если данное отношение меньше некоторого  $B$  (нижний порог принятия решения), то устанавливается диагноз  $D_1$ . При нахождении отношения в интервале между этими порогами мы не можем принять решения. Проводится обследование по следующему симптому  $S_2$ , пусть этот симптом не обнаружен. Отношения условных вероятностей отсутствия симптома  $S_2$  при указанных диагнозах умножают на имеющееся отношение по симптому  $S_1$  и произведение вновь сравнивают с границами  $A$  и  $B$ :

$$\frac{p(S_1 | D_2)}{p(S_1 | D_1)} \cdot \frac{p(S_2 | D_2)}{p(S_2 | D_1)} > A? \dots < B?$$

Этот процесс последовательного введения сомножителей продолжается до тех пор, пока произведение отношений условных вероятностей не станет больше  $A$  или меньше  $B$ . При этом количество симптомов заранее не определено.



Если признаки  $S_1$  и  $S_2$  зависимы, то надо определить вероятность наличия  $S_2$  при условии наличия и отсутствия  $S_1$ , и так для всех признаков. Практически этого не делают, предполагая, как и в формуле Байеса, статистическую независимость признаков.

При редких заболеваниях использование самых эффективных тестов может быть недостаточным для достижения диагностического порога и принятия решения. Это отражает проблему диагностики редких заболеваний в медицине в целом. Врачи при этом испытывают значительные трудности и обычно склоняются к диагнозу более часто встречающегося сходного заболевания, т.е. принимают решение на основании только априорной вероятности болезни.

Для оптимального использования метода Вальда необходим предварительный выбор наиболее информативных тестов, результаты которых в первую очередь используются в процедуре диагностики.

## *2. Оценка информативности признаков*

Эта задача весьма важна для клинической практики. Решение ее необходимо не только для выбора признаков, в первую очередь используемых для диагностики, но и для снижения размерности информации. Снижение размерности информации упрощает обоснование содержательной стороны диагностики, уменьшает количество вычислений, а результаты диагностики улучшаются при исключении из входных переменных малоинформативных признаков.

Приведенные ниже методы оценки информативности используются для качественных признаков. В основе их лежит простое допущение: наиболее ценен для диагностики признак,

который увеличивает (снижает) вероятность диагноза в большее число раз.

Один из способов оценки информативности – расчет меры диагностической ценности симптома  $K(s) = \frac{p(s|D)}{p(s)}$ .

Для синдрома, состоящего из  $N$  симптомов:

$$K(S) = \left( \sum_i \frac{p(S_i | D_j)}{p(S_i)} \right) / N, \text{ где } S_i - \text{признаки, составляющие}$$

синдром,  $D_j$  – одна из форм заболевания. Реальная диагностическая ценность у симптомов и синдромов есть, когда значение этой меры превышает единицу. При анализе класса заболеваний используется мера общей диагностической ценности синдрома, в которой учитывается априорная вероятность каждой нозологической единицы:

$$K_t(S) = \sum_j p(D_j) \cdot K(S).$$

На практике используется и ряд других способов оценки диагностической ценности (информативности) признаков:

1. Информационный вес симптома, фактически это логарифм меры диагностической ценности:  $I = \lg \frac{p(S | D)}{p(S)}$

2. Информационная мера симптома:  $\alpha = \lg \frac{p(D | S)}{p(D)}$

3. Информационная степень по Шеннону:  
 $\rho = p(S | D) \cdot \lg[p(S | D)]$

4. Диагностический вес признака для заболевания  $D_j$ :  
 $z_j = p(S | D_j) \cdot \lg \frac{p(S | D_j)}{p(S)} + [1 - p(S | D_j)] \cdot \lg \frac{1 - p(S | D_j)}{1 - p(S)}$

А для всей группы диагнозов:  $Z = \sum_j^n z_j \cdot p(D_j)$

5. Дивергенция Кульбака оценивает информативность симптома для диагностики некоторого заболевания  $D_1$  относительно другого заболевания или группы диагнозов  $D_2$ :

$$R = [p(S | D_2) - p(S | D_1)] \cdot \lg \frac{p(S | D_2)}{p(S | D_1)}$$

6. В случае существенного различия априорных вероятностей двух диагнозов (состояний) можно использовать оценку информативности по Гублеру:

$$r = [p(D_2) \cdot p(S | D_2) - p(D_1) \cdot p(S | D_1)] \cdot \lg \frac{p(S | D_2)}{p(S | D_1)}$$

7. Диагностический коэффициент, или диагностический балл, тесно связан с методом Вальда:

$$DC = m \cdot \lg \left[ \frac{p(S | D_2)}{p(S | D_1)} \right], \text{ где } m=5,10,100 \text{ для удобства}$$

вычисления. Введение логарифма позволяет умножение диагностических коэффициентов в ходе анализа заменить сложением по мере их определения. Диагностический коэффициент – одновременно и оценка информативности, и обоснование последовательности включения признаков в анализ Вальда.

### 2.3.3. Принятие решений в условиях неопределенности последствий

Существует не так много подходов к выбору в условиях неопределенности последствий, т.е. в ситуации, когда неизвестно, к какому исходу приведет выбор данной

альтернативы. Одним из таких подходов являются методы теории игр.

Невозможность точно оценить последствия наших действий напоминает игру с равным противником. В теории игр для принятия решений используется минимаксная стратегия. Пусть множество наших стратегий обозначено  $A$ , стратегий противника –  $B$ . Наш выигрыш возможен только за счет проигрыша противника. Обозначим наш минимальный выигрыш при выборе своей стратегии "а", наш максимальный выигрыш при выборе стратегии противником (максимальный проигрыш противника) – "b". Мы стремимся увеличить «а», противник – уменьшить «b».

	$B_1$	$B_2$	$B_3$	a
$A_1$	3	5	2	2
$A_2$	10	1	7	1
$A_3$	4	3	4	<b>3</b>
b	10	<b>5</b>	7	

Предполагая, что противник разумен и осторожен, мы ожидаем, что он выберет стратегию, при которой рискует потерять меньше всего, т. е. будет стремиться к самому маленькому из максимальных наших выигрышей. Нам же нужно выбрать ту стратегию, которая дает самый большой из минимальных наших выигрышей. *Максимином* называется гарантированный результат, или нижняя цена игры (в данном случае она соответствует стратегии  $A_3$ ) – наш выигрыш не будет меньше 3 при любой стратегии противника. *Минимакс*, или верхняя цена игры – наш минимальный выигрыш из всех максимальных при выборе стратегии противником. Стратегия игры ( $A_3, B_2$ ) называется минимаксной.

Медицинская диагностика – это, в некотором смысле, игра с природой. Стратегиями игры при этом можно считать разные причины патологии, разные состояния организма. В процессе диагностики и лечения мы выбираем свою стратегию, точно не зная причины заболевания – и в этом источник неопределенности последствий выбора.

В теории игр используется несколько критериев оптимальности выбора стратегии:

1. Критерий Вальда отражает позицию пессимизма. С этой позиции следует рассчитывать лишь на минимальные из возможных выигрышей, выбирая максимальные из них.
2. Критерий Лапласа (индетерминизма) предполагает равновероятность состояний. В соответствии с этим критерием оптимальна стратегия с максимальным средним выигрышем.
3. Критерий Гурвица более универсален:

$$H_i = y \cdot \min\{a_{ij}\} + (1 - y) \cdot \max\{a_{ij}\},$$

где  $a_{ij}$  – наши выигрыши,  $y$  – отражает степень пессимизма (нежелание рисковать), изменяется от 0 до 1. Чем меньше  $y$ , тем больше оптимизм, при  $y=1$  это критерий Вальда, при  $y=0,5$  – критерий Лапласа.

Допустим, у пациента с хронической сердечной недостаточностью на фоне комплексной терапии (сердечные гликозиды, вазодилататоры, калийсберегающие салуретики) возникает пароксизм мерцания предсердий. Наиболее вероятными представляются две причины мерцания (два состояния организма) – аберрантные наджелудочковые комплексы (1) и желудочковая экстрасистолия (2). Какую лечебную стратегию должен выбрать врач?

Пусть врач располагает тремя стратегиями:

- $A_1$  – продолжить проводимую терапию, использовать кордарон, магний,
- $A_2$  – прервать терапию, использовать кордарон, магний,
- $A_3$  – прервать терапию, использовать кордарон, магний, унитиол.

В качестве выигрыша в этой "игре" можно рассматривать вероятность купирования пароксизма мерцания предсердий, известную по данным литературы и опыту врача:

	(1)	(2)
$A_1$	0,6	0,2
$A_2$	0,5	0,6
$A_3$	0,4	0,8

При использовании критерия Вальда (максимальный из минимальных выигрышей в каждой стратегии) врачу надо выбрать стратегию  $A_2$  (выигрыш 0,5). При использовании критерия Лапласа (равновероятность причин мерцания) предпочтительна стратегия  $A_3$  (выигрыш 0,6).

В критерии Гурвица результат зависит от осторожности врача. Если он не склонен к риску, например  $y=0,7$ , то  $A_2$  – предпочтительная стратегия (выигрыш 0,53). Если врач оптимистичен и склонен к риску, например  $y=0,3$ , то он выберет  $A_3$  (выигрыш 0,68). С учетом приведенных критериев ясно, по крайней мере, что продолжать проводимую ранее терапию нельзя.

Для выбора в условиях неопределенности эффективной является также комбинация вероятностных методов с оценкой ожидаемой полезности решений, с учетом цен методов и результатов (разделы 2.2.8 и 2.2.9). Многоэтапное принятие решения представляется в виде ориентированного графа, или

дерева решений. В развилках этого дерева выбор одного из дальнейших путей по графу либо производится лицом, принимающим решение (врачом), либо является следствием случайных событий. В последнем случае мы можем только оценить вероятность данного выбора. При этом в случае отсутствия достаточной информации для объективной оценки вероятности допускается использование так называемых субъективных вероятностей, т.е. степени уверенности врача в наступлении дальнейших событий.

В случае проведения исследований для принятия этапных решений апостериорная вероятность исходов оценивается по формуле Байеса при известных априорной и условной вероятностях, либо их субъективных аналогах (раздел 2.3.2). Затраты на проведение обследований учитываются при расчете ожидаемой полезности решений.

## **2.4. Эффективность алгоритмического подхода**

### **2.4.1. Ошибки диагностики**

В медицине обсуждение ошибок сразу создает напряженную ситуацию. Однако, медицинский диагноз – вероятностная проблема, и признание неясности в этом вопросе неизбежно. С точки зрения статистики, процесс диагностики – это проверка гипотезы. Установление диагноза заболевания можно рассматривать как отклонение нулевой гипотезы об отсутствии различий между тестируемым человеком и генеральной совокупностью практически здоровых людей.

Можно связать классификацию статистических ошибок с традиционно принятыми в медицине терминами. Гипердиагностика (ложноположительный результат) – это

ошибка первого типа ( $\alpha$ -ошибка), которая состоит в отклонении нулевой гипотезы, когда она верна, т.е. в признании здорового человека больным. Гиподиагностика (ложноотрицательный результат) – это ошибка второго типа ( $\beta$ -ошибка), принятие неверной нулевой гипотезы об отсутствии различий между больным и генеральной совокупностью здоровых. Допустимый уровень ошибок – величина произвольная, но в медико-биологических исследованиях принято, по предложению Р.Фишера, считать допустимым не более одной ошибки на 20 решений ( $p < 0,05$ ).

Ошибки, как вероятностные величины, тесно связаны с теоретическими порогами принятия решений при использовании вероятностных методов. Пороги определяются соотношением допустимых значений ошибок первого и второго рода. В случае использования в процедуре Вальда диагностического коэффициента, его значение сравнивается с логарифмом этого отношения, умноженного на коэффициент  $m$ :

$$A = m \cdot \lg \frac{1 - \alpha}{\beta}, B = m \cdot \lg \frac{\alpha}{1 - \beta}.$$

Уменьшение допустимых значений ошибок приводит к уменьшению неправильно диагностированных случаев, но увеличению числа отказов от принятия решения (области неопределенности). Поэтому необходим определенный баланс ошибок, зависящий от тяжести распознаваемых диагнозов, наличия медицинских ресурсов, загруженности врачей.

Считается, что в медицине ложноположительный результат не так опасен, как ложноотрицательный, т.е. оставление больного без лечения. Может быть, это утверждение справедливо скорее для тяжелых, инфекционных, социально



опасных заболеваний, но разница между типами ошибок в любом случае существует, поэтому ошибки и их последствия надо взвешивать.

В медицине есть и еще один аспект ошибок – этический. Для достижения статистической значимости эффекта лечения необходимо увеличение числа испытуемых. Это означает, что больше людей подвергается риску при испытании нового метода. С другой стороны, проведение испытаний на малых группах неэтично, так как они ничего не докажут с установленным уровнем значимости. По правилам организации эксперимента эффект от оперативного лечения должен сравниваться с эффектом от ложных операций – но их нельзя специально проводить на людях. Применение новых методов терапевтического лечения должно сравниваться с эффектом плацебо – но этично ли давать плацебо группе больных, оставляя их без лечения?

Ошибки диагностики неизбежны, и наша цель – минимизировать их количество и оптимизировать их соотношение. Исследования показали, что врачебные и алгоритмические ошибки диагностики примерно равны количественно, но совпадают только в трети конкретных случаев. Это означает целесообразность дополнения врачебных решений алгоритмическими. Перспективы повышения качества диагностики связаны с накоплением статистического материала, внедрением количественных показателей, тщательным изучением клиники заболевания, с развитием фундаментальной медицины и алгоритмизацией клинической практики.

### 2.4.2. Сравнение эффективности диагностических алгоритмов

Самый простой метод сравнения эффективности тестов представляет отношение:  $K = \frac{N - \bar{N}}{N_0}$ , где  $N$  – число правильных ответов,  $\bar{N}$  – число ошибок,  $N_0$  – общее число случаев. Однако при одинаковой доле правильных решений эффективность диагностических алгоритмов будет различаться в зависимости от преваленса патологии. Кроме того, совершенно необходимо различать ошибки гипо- и гипердиагностики. С учетом этого можно предложить следующий способ оценки эффективности диагностических алгоритмов:

$$E = \frac{1}{p^*(D)} \cdot \sum_j \frac{p^{\wedge}(D_j) \cdot \theta_j}{p(D_j) \cdot \sum_k p''(D_{jk}) \cdot R_{jk}},$$

где  $p(D_j)$  – априорная вероятность заболевания,

$p^{\wedge}(D_j)$  – апостериорная вероятность правильного ответа,

$\theta_j$  – коэффициент сложности диагноза,

$p''(D_{jk})$  – апостериорная вероятность ошибки типа  $k$  вместо  $j$ ,

$R_{jk}$  – коэффициент важности ошибки,

$p^*(D)$  – апостериорная вероятность отказа от постановки диагноза.

Этот критерий пропорционален частоте правильных ответов и сложности диагноза, обратно пропорционален частоте встречаемости заболевания и числу отказов от принятия решения. Коэффициенты сложности диагноза и важности ошибок устанавливаются на основе врачебного опыта. При этом

коэффициенты важности ошибок могут различаться для случаев " $i$  вместо  $j$ " и " $j$  вместо  $i$ ".

В целом вероятностные методы алгоритмической диагностики имеют преимущества при часто встречающейся патологии. Они привлекают также простотой, понятностью неспециалистам, эффективностью. Принятие решения при использовании метода Вальда в среднем возможно быстрее, чем при обследовании по полной формуле Байеса, а метод Байеса хорошо зарекомендовал себя при высокой априорной вероятности заболевания.

### **2.4.3. Этапы диагностического исследования**

Алгоритмический подход широко и успешно используется при диагностике и прогнозировании заболеваний. При этом можно выделить несколько типичных этапов диагностического исследования:

Подготовительный этап включает три основные блока:

1. Четкую и конкретную формулировку цели и задач исследования, а также его отдельных этапов. Конечно, исследование начинается, когда проблема объективно существует. Но формулировку проблемы заказчиком (врачом) можно считать лишь первым приближением к рабочей формулировке. Поставленная проблема никогда не бывает единственной, изолированной, анализ приводит к ее расширению до определения проблематики, формулировки системы проблем, без которой декларируемая не может быть решена. Проблему сформулировать относительно просто, так как проблема – это то, что существует, но не устраивает нас. Цель работы является антиподом проблемы, поскольку цель – это то, чего не существует, но чего мы хотим добиться.

Цель может быть сформулирована заказчиком на разном уровне конкретности. Например:

Цель «Снижение количества рецидивов заболевания А» лишь слегка обозначает предметную область.

Цель «Оценка эффективности противорецидивного действия препарата В при заболевании А» значительно более конкретна.

«Выбор одного из тестируемых препаратов по частоте отсутствия рецидивов в отдаленном анамнезе» – вполне конкретная формулировка цели.

В любом случае, первичная формулировка цели – лишь ее модель, построенная заказчиком. Признак цели – формулировка ее в номинальной шкале, использование более сильных шкал характерно для задач и критериев более низкого уровня. Количественными моделями качественных целей являются критерии выбора альтернатив. Определение значения критерия для данной альтернативы – косвенное измерение степени ее пригодности как средства достижения цели.

2. Изучение существующих классификаций заболеваний и используемых для диагностики или прогноза признаков. Выбор пределов уточнения диагноза, степень детализации классификации – общая проблема вычислительной диагностики. Всегда трудно решить, остановиться на нозологической формулировке, либо уточнить локализацию, стадию и т.п. Вычислительная диагностика жестко зависит от принятой классификации болезней и принципов формулировки диагноза. Чем подробнее диагноз, тем точнее лечение, но при этом требуется больше информации для его постановки, увеличиваются количество обследуемых, время обработки и число ошибок.

3. Разработка общей терминологии, номенклатуры. Общеизвестными в мире являются лишь МКБ-10 и анатомическая классификация. Часто именно из-за отсутствия общей терминологии возникает непонимание между участниками разработки.

Этап формирования выборок. На этом этапе основное внимание обращается на репрезентативность выборок, обеспечивающую обобщаемость результатов. В обучающую выборку иногда включают больных, информация о которых получена не при обследовании, а по архивным историям болезни. Экзаменационная выборка должна соответствовать обучающей по количеству, основным клиническим и демографическим параметрам, желательно и по способу регистрации.

Этап подготовки к диагностике включает:

- Составление перечня признаков, используемых в алгоритме диагностики, их описание, обеспечение достаточности.

- Оценка информативности признаков.
- Выбор метода классификации.
- Выбор клинических, социальных, экономических, психологических показателей эффективности диагностики или прогноза.

Этап обучения диагностике включает предварительное определение диагноза или прогноза (описание классов на языке признаков) по небольшому количеству наиболее информативных и простых, наименее дорогих признаков на обучающей выборке. В случае неудовлетворительного описания классов происходит возвращение на этап выбора алгоритма, изменение, добавление признаков. Надо отметить, что при

использовании более 100 признаков качество диагностики почти не зависит от их количества.

Проверка эффективности производится на экзаменационной выборке больных в случае удовлетворительного результата на обучающей выборке. Если результат, полученный на экзаменационной выборке, в целом удовлетворяет разработчиков, проводится предварительная оценка эффективности диагностики, при необходимости – коррекция диагностических порогов.

Завершающий этап имеет целью оптимизацию алгоритма для удобства его практического использования и проводится только после достижения хорошей диагностической эффективности. Этот этап включает окончательный выбор признаков, алгоритма, оценку эффективности распознавания (диагностики, прогноза), сравнение эффективности разных использованных методов, борьбу с избыточностью информации (исключение малоинформативных, сильно связанных признаков).

Типичен пример разработки по диагностике менингококковой инфекции у детей. Цель была сформулирована как выявление врачами, не являющимися узкими специалистами, гипертоксической формы менингококковой инфекции (ГТМИ) среди других тяжелых форм детской патологии. Эта цель оправдана, так как существует эффективное лечение ГТМИ при раннем ее выявлении. Кроме того, по статистике исходов часто наблюдается гиподиагностика ГТМИ врачами, но редко – гипердиагностика (36% и 7%, соответственно), т.е. наблюдается неоптимальное соотношение ошибок 1-го и 2-го рода.

Обучающая выборка состояла из 378 больных (114 с ГТМИ и 264 со схожими тяжелыми инфекционными состояниями), у которых были известны точный диагноз, исход и имелся катамнез. На первом этапе работы было выбрано 53 признака, из них по 7 оказалось мало данных, а 9 были мало информативны. В итоге для диагностики использовали 37 признаков. В качестве метода диагностики был выбран алгоритм Байеса. По итогам исследования получены следующие результаты: гиподиагностика наблюдалась в 6% случаев, гипердиагностика – в 8 %.

Абсолютная объективность и детерминированность в медицине невозможны из-за, как минимум, двойной неопределенности. С одной стороны, нечетка и недетерминирована информация о пациенте, она всегда неполна и может быть искажена. С другой стороны, информированность врача неабсолютна. Сказываются и особенности переработки информации человеком: ограниченный объем кратковременной памяти, преимущественно последовательный способ обработки, эвристические упрощения, обучение методом проб и ошибок, преобладание неформализуемого опыта и интуиции над формализуемыми знаниями. В силу этого решение в медицине всегда вероятностное, а уровень информированности врача и информационное состояние объекта лишь влияют на степень обоснованности решения.

Алгоритмические методы используются на промежуточном этапе обоснования медицинского решения. Врач формулирует множество возможных решений на этапе постановки задачи, принимает окончательное решение после окончания обследования больного, а алгоритмические методы

являются средством выделения из совокупности решений области наиболее эффективных.



### 3. ЭВРИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

При алгоритмическом подходе абстракция полезна и необходима. Но часто эта необходимость выхолащивает сущность задачи и снижает практическую ценность результата. В силу этого для решения сложных задач алгоритмический подход может оказаться низкоэффективным, либо эффективным только при определенных жестких ограничениях. В то же время человек решает такие задачи без ЭВМ, даже без достаточного количества информации, но его решения зачастую эффективны. Кроме того, не всякая деятельность человека может быть описана алгоритмически, и не в любой ситуации этот алгоритм может быть осознан человеком.

Для решения любой проблемы человеком используются некоторый язык и определенный механизм получения выводов. Описываемые в этом разделе языки и механизмы выводов несколько отличаются от используемых в традиционном алгоритмическом программировании, опираются прежде всего на эвристические знания и основой их является наука о знаниях – когнитология.

Слово «эвристический» происходит от греческого *heurisko* – нахожу. Термин «эвристика» ввел Пойа в 1954 г. в книге «Математика и правдоподобные рассуждения». Он утверждал, что способы, которые применяют математики для получения доказательств, имеют мало общего со способом представления этих доказательств в окончательной форме. Термин «эвристика» он определил расплывчато, как легко применяемые и часто, но не всегда, приводящие к нужному решению методы.

Действительно, границы эвристик определить довольно сложно. К ним можно отнести найденные опытным путем способы решения сложных задач в приемлемое время с допустимой точностью. Недостатком эвристик является то, что мы редко можем узнать, насколько полученное эвристическим путем решение близко к действительно оптимальному, не является ли полученное решение локальным, оптимальным лишь в узких границах.

Можно выделить несколько эвристических стратегий:

1. Конструктивная стратегия – приближение к решению путем добавления отдельных компонент с максимальной выгодой на каждом шаге. В деятельности врача примером этой стратегии может служить ургентная медицина. При угрожающих жизни состояниях врач уделяет внимание прежде всего тем симптомам, от развития которых может зависеть жизнь больного, и последовательно купирует их, абстрагируясь от прочих проявлений болезни.
2. Стратегия декомпозиций – разделение проблемы на более простые подзадачи, поддающиеся решению. Результат решения одной подзадачи часто является входной переменной для другой. Примером может служить процесс диагностики с решением подзадач анализа данных анамнеза, осмотра, результатов параклинических исследований.
3. Манипулирование моделью – упрощение ее, уменьшение пространства решений, переход от сложных к линейным функциям, уменьшение количества переменных и т.п. Врач, зная о существовании редких форм болезни, обычно не рассматривает их наравне с широко распространенными формами, упрощая для себя задачу диагностики.

Эвристические приемы применяются при решении задач в рамках сложных систем, зависящих от большого количества разнородных переменных в условиях, когда из-за сложности или недостаточности информации нельзя точно очертить границы их применения и оценить допустимые ошибки. Эвристические решения начинаются в условиях отсутствия алгоритма и каких-либо сведений о существовании решения и его единственности, со сбором дополнительной информации в процессе поиска решения. Врачебное мышление в принципе эвристично. Внешне логичные рассуждения опытного врача – приемлемая форма интерпретации сугубо интуитивной процедуры. Именно поэтому в медицине особое значение имеют извлечение и представление знаний в процессе обучения как человека, так и интеллектуальных компьютерных систем.

Эвристические методы предполагают изучение принципов переработки информации человеком на разных этапах решения в зависимости от структуры задачи, широкое изучение методов работы человека в условиях недостатка информации, исследование структуры знаний человека.

### ***3.1. Свойства и особенности знаний***

Мы ориентируемся в окружающем мире благодаря получаемой из него информации. Этот широкий и широко используемый термин включает любые сведения, отражающие реальный мир, в том числе знания и данные. Широкие границы данного термина позволяют предположить неоднородность его содержания. Действительно, существуют различия между конкретной и обобщенной информацией.

Обобщенная (интенциональная) информация включает определения терминов, способы решения задач, принципы

выбора тактики поведения, т. е. соответствует концепту «знание». Интенционал понятия – это правило, следуя которому, мы можем определить, действительно ли мы имеем дело с данным понятием.

Напротив, экстенционал понятия – конкретные значения признаков, конкретные факты, реализации свойств и отношений объектов, т.е. данные. Например, интенционал понятия СОЭ включает информацию о физико-химических механизмах, методах определения, факторах, влияющих на этот параметр. Экстенционал СОЭ – конкретный показатель некоторого человека, распределение его в некоторой выборке, сведения о средних значениях в здоровой популяции.

Обработка знаний является одной из технологий работы с интенциональной информацией. Знания раскрывают смысл данных и делают их полезными, поскольку интерпретация данных происходит именно на основе имеющихся знаний. Реальные знания – это та обобщенная информация, которая может быть эффективно использована при решении задач.

### **3.1.1. Свойства знаний**

Знания имеют особую, самостоятельную ценность. Они накапливаются годами, далеко не всегда формализованы, часто интуитивны и эвристичны. В работе со знаниями можно выделить некоторые типичные этапы:

1. Создание.
2. Получение.
3. Структурирование.
4. Классификация.
5. Передача.
6. Использование.

Это циклический процесс, в котором участвуют разные специалисты. 1-й, 2-й и 6-й этапы более характерны для пользователей, врачей, ученых. На 3-5-м этапах больший вклад вносят информатики, инженеры по знаниям.

В последнее время значительное развитие в производстве и экономике на Западе получило направление, называемое knowledge management – управление знаниями. Управление знаниями актуально в современном производстве, его внедрение обосновано:

- необходимостью экономии знаний,
- уменьшением времени жизни знаний,
- "глобализацией" решений (учет информации обо всех связанных с данной проблемой областях),
- улучшением технологий, быстрой и дешевой обработкой данных,
- увеличением подвижности людей, возможностью смены работ,
- необходимостью выявления работников, неэффективно использующих знания.

Общепризнанное определение знаний отсутствует, признаются лишь их избыточные возможности по сравнению с данными. В качестве рабочих определений этих двух терминов можно принять следующие:

Данные – совокупность фактов, характеризующих объекты, процессы и явления предметной области.

Знания – совокупность закономерностей предметной области, используемых для постановки и решения задач.

Можно выделить некоторые свойства знаний:

1. Внутренняя интерпретируемость. Знания можно интерпретировать сами по себе, данные же могут быть

интерпретированы только через знания о способах их использования, в рамках определенных теорий и гипотез.

2. Структурированность. Информационная единица знаний может быть расчленена или объединена с другими. Это свойство можно назвать рекурсивной вложенностью информационных единиц (принцип матрешки), оно предполагает установку принадлежности элемента знаний к классу элементов.

3. Связность. Между элементами знаний можно установить причинно-следственные, иерархические и другие связи, создать временные классификации и т.п. Это свойство обеспечивает построение выводов, анализ знаний на противоречивость и совместимость.

Первые три свойства, как правило, обеспечиваются установкой для элементов знаний связанной системы имен. Это позволяет знать, что хранится в базе знаний, и отвечать на нечеткие вопросы об ее содержании.

4. Семантическая метрика. Это свойство позволяет описывать смысловую близость элементов знаний в контексте решения задачи.

5. Активность. Элементами знаний являются стратегические и тактические планы действий, процедуры, алгоритмы, определяющие необходимые действия человека. Это принципиально отличает их от данных, которые вторичны относительно процедур.

Знания являются обобщенной информацией о свойствах и законах ПО, с помощью которой реализуются процессы решения задач, преобразования данных и самих знаний. Итак, знания, в отличие от данных, являются концептуальной

моделью исследуемой предметной области. База знаний – основа любой интеллектуальной системы.

Кроме данных и знаний, существует понятие умения, которое отражает возможность принимать решения в конкретной ситуации на основе интерпретации данных в рамках имеющихся знаний. Квалификация врача увеличивается, когда увеличиваются его знания и развиваются умения оптимально использовать те же данные, обоснованнее делать выводы, надежнее ставить диагноз.

Выделяют следующие уровни применения знаний:

- 1) эмпирическое приложение, обычно связанное с умениями,
- 2) преобразование самих знаний и умений,
- 3) разработка единой модели знаний и умений, обеспечивающей гибкое реагирование на новую информацию,
- 4) стратегическое планирование решения задач.

### **3.1.2. Типы знаний**

В целом знания разделяют на декларативные и процедурные. Декларативные знания описывают характеристики, свойства, особенности объектов и явлений, процедурные же тесно связаны с умениями и включают знания о действиях, операциях, процессах. Эти два типа знаний не исключают друг друга, и в процессе анализа знаний имеет место как конструктивизация (перевод декларативных знаний в процедурные), так и дескриптивизация (перевод процедурных знаний в декларативные).

Можно выделить следующие типы знаний:

1. Базовые элементы (объекты реального мира), которые связаны с непосредственным восприятием человеком, и

добавляются к базе знаний в исходном виде. Среди них можно выделить:

- Сущности – понятия, которые отражают объекты ("термометр").
- События – понятия, отражающие процессы, происходящие с сущностями ("измерение температуры").
- Значения – понятия, представляющие интерес только в связи с некоторой сущностью или событием ("высокая" – имеется в виду температура).

2. Связи между объектами. Их можно подразделить на:

- Отношения, которые представляют связи между сущностями, между событиями, между сущностями и событиями ("термометр" – "измерение температуры").
- Атрибуты, которые являются свойствами базовых элементов, т.е. связями между сущностью или событием, с одной стороны, и значением – с другой ("высокая" – "температура").

3. Утверждения и определения, основанные на базовых элементах и заранее рассматриваемые как достоверные (аксиомы).

4. Концепции, которые можно рассматривать как обобщения представления базовых элементов и связей между ними.

5. Алгоритмы, описывающие необходимые действия в строго определенном порядке (другие знания могут быть неупорядочены).

6. Теоремы – утверждения и определения, степень достоверности которых нельзя определить заранее. Теоремы и последующие типы знаний сопровождаются правилами их



использования и принципиально отличают базы знаний от СУБД.

7. Стратегии – общие правила поведения, позволяющие в конкретной ситуации принять решение. Стратегии являются фундаментальным типом человеческих знаний.

8. Метазнания – это знание того, что известно, со степенью доверия этому. Такой тип знаний используется для разработки стратегий, это знание о знании. Метазнания существуют относительно объектов (структура описания объекта, связей между ними, сравнение их свойств), правил (модели правил с учетом периодичности и условий их использования, проверка соответствия новых правил базе знаний), стратегий (управление поиском решения, стратегия уменьшения пространства поиска).

### **3.1.3. Нечеткие знания**

Плохо поставленные задачи существуют в любых предметных областях. И плохо поставлены они не из-за неумения специалистов, а из-за нечеткости, изначально присущей знаниям. Люди повседневно решают задачи в этой среде, и в медицине часто встречаются нечеткие знания. Однако эта нечеткость может быть разных видов:

1. Многозначность – наличие более одного значения термина. Это обычное явление при понимании естественных языков, распознавании изображений, которое устраняется за счет информационного контекста, семантического анализа предложения.

2. Ненадежность – означает, что вероятность истинности или ложности элемента знания не равна единице. В математике ненадежность оценивается вероятностью. Вероятность в классическом смысле – это мера повторяющихся событий в

идеальных системах. В медицине каждый пациент уникален, и точнее говорить не о вероятности, а о доверии тому, что некоторое событие произойдет, или что факт истинен при заданном условии. Условная вероятность некоторого события, не равная 0 или 1, означает, что мы не полностью уверены, что это событие произойдет в данной ситуации, а с определенным уровнем доверия.

В инженерии знаний ненадежность оценивается коэффициентами уверенности. Возможность гипотезы определяется оценкой эксперта, и этот термин близок к понятию доверия. В отличие от теории вероятностей, сумма возможностей всех гипотез не обязательно равна единице, это означает, что в отличие от теории вероятностей в инженерии знаний допускается незнание.

3. Неполнота является принципиальным свойством знаний человека. Можно перечислить верные, но нельзя определить и перечислить неверные (или все возможные) знания. Если в диагностической задаче фигурирует кардиограф, то считается, что он исправен, имеются электроды и провода, а в сети есть напряжение. Невозможно и ненужно полностью описывать отсутствующие неисправности прибора. В базах знаний обычно определяют только верные знания, а неупомянутые утверждения относят к ложным. Такой подход называется концепцией закрытого мира.

4. Нечеткость знаний означает, что вероятность принадлежности некоторого объекта к классу не равна единице, т. е. мы не можем утверждать наверняка, принадлежит ли данный элемент к данному множеству. Нечеткие множества без уточнения границ предложены Л. Заде в 1965 г. Нечеткое множество представляет совокупность пар вида (значение;

функция принадлежности значения нечеткому множеству, отражающая уверенность эксперта), или  $\{x, f(x)\}$ . Вид этой функции сугубо специфичен для каждой предметной области. Тем же автором введено понятие «лингвистической переменной» – это переменная, значение которой определяется набором вербальных характеристик некоторого свойства. Эти понятия положили начало так называемым «мягким вычислениям» (soft computing).

Теория нечетких множеств – шаг на пути к сближению точности классической математики и всеобъемлющей неточности (сложности) реального мира.

### **3.2. Приобретение знаний**

Приобретение знаний в узком смысле – это работа по заполнению базы знаний. Но ведь кто-то должен выбрать знания, которые необходимо поместить в базу, и соответственно их представить. В ходе этой работы часто выявляются недостатки базового понимания предметной области, формы представления знаний и методов их использования. Именно этой работой занимаются инженеры по знаниям, специалисты – когнитологи.

В США работают десятки тысяч фирм-консультантов в широком спектре областей, фактически это специалисты по принятию решений, коллеги инженеров по знаниям, системные аналитики. Они не знают деталей проблем, но знают общие способы извлечения знаний и принятия решений. Когнитологи применяют системный подход, включающий формулировку цели, анализ средств (альтернатив), ресурсов, разработку моделей (математических или логических), критериев выбора альтернатив. Системный когнитологический анализ эффективно

используется для слабоструктурированных проблем, учитывает неопределенность и качественный характер суждений.

В англоязычной литературе для обозначения процесса приобретения знаний используются два основных термина – acquisition (собственно приобретение знаний) и elicitation (извлечение, выявление знаний). Второй термин однозначно предполагает участие в этом процессе двух специалистов – эксперта в предметной области и инженера по знаниям.

В ходе извлечения знаний происходят многоэтапная их трансляция и конструирование нескольких моделей:

- восприятие и интерпретация действительности экспертом, т.е. создание им личной модели предметной области,
- вербализация знаний эксперта им самим,
- восприятие и интерпретация знаний инженером по знаниям, создание им своей модели предметной области,
- формализация и представление инженером по знаниям своей модели.

В процесс общения вовлечены его участники (партнеры, источники знаний), предмет общения (знания) и определенные средства общения. Поэтому можно выделить три аспекта извлечения знаний: психологический, гносеологический, лингвистический.

Психологический аспект доминирует в процессе организации общения с экспертом. Общение – это не односторонняя передача информации и не обмен ее порциями, а циркуляция информации, в ходе которой происходит выработка новой, т.е. совместный поиск истины. Происходить оно может на разных уровнях, с разной степенью глубины и сотрудничества:

- манипулятивный уровень (один субъект рассматривает другого как средство достижения цели),
- правовой уровень (субъекты признают право друг друга на свои цели и проекты и пытаются согласовать их),
- единства цели (субъекты внутренне принимают общие цели).

Последний уровень, естественно, является идеальным для инженерии знаний. Engineering – это искусная обработка, изобретение чего-либо, а три основных вопроса инженерии знаний – откуда, что и как извлекать.

### 3.2.1. Источники знаний

Их столько, сколько способов получения информации в данной предметной области. Например:

1. Учебники и справочники.
2. Конкретные материалы научных исследований, специальная литература.
3. Методики.

Перечисленные источники различаются по степени концентрации специальных знаний, по соотношению специальных и общих (фоновых) знаний, по трудоемкости извлечения знаний. По этим причинам когнитологу легче работать с учебниками и труднее с методиками и специальной литературой.

4. Пользователи. Это нечеткое понятие, поскольку пользователями являются и инженер по знаниям, и эксперт, и специалист, для которого в итоге разрабатывается база знаний, т.е. конечный пользователь. Знания конечного пользователя особенно важны при разработке интерфейса, при анализе эффективности работы программы. Одна из основных задач

инженера по знаниям – в кратчайший срок уточнить, кто конкретно является конечным пользователем программы. При этом надо учитывать не только потребности пользователя, но и его характеристики, знания и познавательные способности. Оптимальной представляется организация обратной связи с пользователем, в ходе которой отслеживаются психофизиологические характеристики пользователя, степень его утомления, реакция, ригидность и т.п.

5. Классический источник знаний – это эксперт в данной предметной области. Любая экспертиза, в том числе в медицине, характеризуется некоторыми свойствами:

- подробный анализ ситуации,
- установление связи между имеющимися данными и теорией,
- не только объяснение наблюдаемых фактов, но и предсказание новых,
- ориентация на выявление причин явлений и эффектов.

В медицине используется два основных типа экспертизы. Первый, близкий к дедуктивному типу вывода, представляет прослеживание цепочки от фактов и данных через знания смежных фактов и механизмов к гипотезам и выводам на научной основе. Второй тип экспертизы представляет вывод по аналогии и основан на рассмотрении и анализе сходных по определенным критериям случаев.

При анализе работы экспертов в медицине существует ряд проблем:

- отсутствие единой модели решения медицинских задач,
- отсутствие объяснений вариаций в решениях и действиях экспертов,
- невозможность полностью охарактеризовать путь от новичка до эксперта.

Различия между новичком и экспертом заключаются не только в количестве знаний, но и в их поведении. Новичок часто торопится выдать решение, когда до него еще несколько шагов, неосознанно имитирует, что может найти решение сразу, без промежуточных стадий рассуждений. В условиях информационной перегрузки поведение новичка и эксперта также различны: новички отказываются от принятия решений, а эксперты упрощают и агрегируют информацию до обрабатываемой размерности. Эксперты лучше определяют характеристики проблемы и конструируют эффективное представление пространства проблем (т.е. определяют структуру знаний). Они представляют знания, основываясь на некоторых принципах, и способны быстро воспроизводить их большие паттерны. У экспертов шире набор стратегий, хорошие навыки самоотслеживания (т.е. метазнания), что позволяет им быстро находить ошибки.

Можно сформулировать несколько особенностей поведения эксперта:

- сложность,
- деление знаний на крупные блоки,
- использование аналогий,
- прямая последовательность в решении, движение от данных к диагнозу (у новичка чаще первичным является выдвижение гипотезы).

В целом, чем более умело, осознанно, эффективно специалист работает со своими знаниями, тем лучшим экспертом он является. Одна из целей программ, основанных на знаниях, – использовать такую структуру знаний, которая позволила бы новичку приблизиться к эксперту.

Поиск настоящего эксперта – сложная задача. Известен так называемый «парадокс Уотермена»: чем выше способности эксперта в предметной области, тем менее он способен к описанию своих знаний. Инженер должен верить не тем знаниям, за которые эксперт ручается, а тем, которые он в действительности использует. Люди часто описывают правдоподобные линии рассуждений, мало похожие на те, которыми они реально руководствуются. Поэтому сложно быть экспертом себе самому и пытаться описать свои знания без инженера-когнитолога. Извлечение знаний желательно доверить другому человеку, потому что:

- Большая часть знаний – результат многочисленных ступеней опыта, описывая который, мы склонны пропускать ряд этапов.
- Именно диалог – наиболее естественная форма изучения памяти и знаний человека. В процессе объяснения, диалога происходит более четкое описание размытых образов и нечетких знаний.
- Эксперту труднее создать модель предметной области из-за глубины знаний, которые у него есть. Определение «скелета» системы проще для стороннего наблюдателя, обладающего меньшей информацией.

Пол и возраст эксперта имеют некоторое значение для эффективности извлечения знаний. Лучшие результаты показывают гетерогенные по полу пары «эксперт – инженер по знаниям», в которых эксперт на 5-20 лет старше.



### 3.2.2. Предмет извлечения знаний

Предметные области в медицине могут быть очень разными. Основное отличие их – степень организации, наличие общепринятой структуры. Различают предметные области:

- хорошо структурированные (четкая аксиоматизация, устоявшаяся терминология, широкое применение математического аппарата),
- средне структурированные (определившаяся терминология, явные взаимосвязи между явлениями),
- слабо структурированные (размытые определения, скрытые взаимосвязи, большое количество "белых пятен").

Большая часть медицинских предметных областей относится к средне и слабо структурированным.

Базовую структуру знаний предметной области можно охарактеризовать совокупностью принадлежащих к ней объектов и связей между ними. В медицинских предметных областях имеет смысл в явном виде запрашивать у эксперта описание класса объектов. Суждение о принадлежности объекта к классу часто выносится только на основе сходства с типичными представителями класса, без учета априорной вероятности этой принадлежности и размера выборки, на которой основывается суждение. При решении задач классификации важно не только узнать факт отнесения объекта к классу, но и оценить вероятность этого. Надо заметить, что люди обычно плохо оценивают вероятность, на их оценку могут повлиять многие факторы:

- личный опыт, т.е. частота и субъективная важность встреч с данным событием,
- внешние воздействия, в том числе точка зрения инженера по знаниям, может сильно смещать оценку вероятности,

- субъективные факторы (чрезмерное доверия своим суждениям, стремление к исключению риска и т.п.).

Движение от описания симптомов к заключению и постановке диагноза, как способ принятия решения экспертом, близко к естественной работе врача. Однако, вследствие ограниченности объема кратковременной памяти человека, люди плохо работают с многомерной информацией, склонны применять упрощающие эвристические правила, направленные на агрегацию информации или ее последовательное рассмотрение, что может исказить экспертные оценки. При выявлении ошибок в полученной информации, неполноты, противоречивости знаний необходимо предъявить эти недостатки эксперту, организовать совместный анализ и целенаправленный поиск ошибок. Работа с инженером по знаниям чрезвычайно полезна эксперту, так как приводит не только к актуализации его знаний, но и к восполнению пробелов в них.

Крайне желательным в начале работы является создание словаря терминов предметной области. Оно занимает достаточно много времени, но важно для успешного завершения работы. Описание объектов в словаре должно быть точным, недвусмысленным и согласованным с представителями всех потенциальных пользователей. Необходимо, чтобы разработчики и пользователи разных категорий одинаково понимали, что собой представляет каждый термин.

Словарь терминов используется для обеспечения их достоверности и минимальной избыточности. Он является базой знаний о терминах, его можно рассматривать как образец метазнаний. О каждом из терминов в словаре может накапливаться следующая информация:

- текстовое описание термина,
- назначение и использование термина,
- предполагаемая частота обращения к термину,
- синонимы (элементы с другими именами, имеющие тот же смысл),
- членство, т.е. составной частью каких элементов является данный элемент и/или какие элементы на него ссылаются.

Словарь терминов обеспечивает выполнение следующих функций:

- 1) установление взаимопонимания между разработчиками;
- 2) осуществление простого и эффективного централизованного управления при вводе в систему новых элементов или изменении существующих;
- 3) уменьшение избыточности и противоречивости данных;
- 4) снижение стоимости модификаций.

### **3.2.3. Способы извлечения знаний**

При получении любого знания человек задействует три основные нейрофизиологические подсистемы:

- Система "подбора". Это в основном сенсорные рецепторы с очень кратковременными буферами, отдельными для каждой сенсорной системы. Информация из подсистемы сенсоров перемещается в рабочую память либо исчезает.
- Рабочая память. Эта подсистема может хранить информацию о 6-8 объектах, создавать программы достижения тактических целей (действия, речь), обеспечить обратную связь в процессе познания. Рабочая память взаимодействует с двумя другими подсистемами.
- Долговременная память имеет сетевую структуру на основе нейронных сетей.

Человеку свойственна семантическая репрезентация информации – запоминается в первую очередь то, что сообщено, а не то, в какой форме. Форма же семантической репрезентации – когнитивная структура, аналог модели представления знаний, и от формы получения информации от эксперта зависит ее надежность.

Лучше использовать привычные в данной профессиональной области методы, формы опроса (анкета, живой разговор, компьютеризированный опросник, запись на видеопленку). Язык эксперта состоит из нескольких компонент:

- общенаучной терминологии,
- специальной терминологии предметной области,
- неологизмов (профессионального сленга),
- бытового языка.

Язык инженера по знаниям в принципе состоит из тех же компонент, за исключением неологизмов, однако содержание компонент может сильно отличаться. Стараться говорить на языке эксперта – обязательное требование к инженеру по знаниям.

Экспертные знания демонстрируются в разговоре с новичком – и инженер по знаниям должен сам быть готов к его роли, либо присутствовать при их разговоре. При этом должны учитываться психофизиологические особенности эксперта. Время сеансов должно зависеть от того, «сова» или «жаворонок» эксперт, глубина анализа и скорость изложения – от темперамента эксперта, способы переключения на другую тему – от уровня его ригидности.

В процессе извлечения знаний всегда надо помнить об их целостности, и в этом полезны подходы гештальт-психологии. Эта теория основывается на целостности

восприятия, в которой важен так называемый «центр ситуации», относительно которого развиваются знания предметной области. Выявляя фрагменты знаний, инженер не должен забывать о главном, о том, что влияет на остальные компоненты, связывает их в некоторую структурную единицу. Гештальтом может быть некоторая идея, гипотеза эксперта, его вера в определенные концепции. Гештальт может не формулироваться явно, оставаться «за кадром», и искусство инженера состоит в его обнаружении.

Существуют две разновидности методов извлечения знаний: коммуникативные и текстологические.

Текстологические методы, согласно названию, основаны на изучении специальных текстов. Использование этих методов эквивалентно пониманию и выделению смысла текста, так как сам текст не содержит смысл, а является лишь инструментом для автора. Знания автора текста лежат во вторичной (макро) структуре, надстраиваемой над первичным текстом. Понимание – это формирование такой семантической структуры. При этом смысл, заложенный автором, как правило, отличается от понятого читающим, что приводит к задаче максимизации соответствия этих смыслов.

Научный текст содержит несколько компонентов, на которые при анализе его надо разделять для выделения действительно важных знаний. К этим компонентам можно отнести наблюдения, научные понятия, субъективные взгляды, а также заимствования и общие места.

Кроме того, для обнаружения смысла очень важен контекст, как окружение основного текста. Различают микроконтекст (ближайшее окружение, смысл абзаца в главе) и макроконтекст (система знаний, связанная с предметной

областью, но явно не указанная в тексте). Любое знание обретает смысл в контексте некоторого метазнания.

Выделяют этапы понимания текста, включающие как дедуктивную, так и индуктивную составляющие:

- определение значений непонятных слов,
- возникновение общей гипотезы смысла текста,
- уточнение значений терминов в контексте общей гипотезы смысла,
- установление внутренних связей между ключевыми словами (формирование внутренней структуры текста). При этом связи могут быть как явные (разделы одной главы), так и скрытые, основанные на контексте.
- образование абстрактных понятий, обобщающих конкретные фрагменты знаний,
- корректировка и принятие общей гипотезы смысла, что во многом эквивалентно разработке макроструктуры текста, его реферата.

Понимание текста инженером по знаниям требует предварительной подготовки, желательно согласованной с экспертом. На понимание смысла текста, кроме самого текста и предварительных знаний аналитика, влияют его личный опыт и общенаучная эрудиция.

Выделяют две основные группы коммуникативных методов получения знаний.

Прямые методы извлечения знаний означают, что эксперта в явном виде просят объяснить, какую информацию он использует или в какой нуждается для решения специфической задачи. Эта информация используется без изменений, не трансформируясь в другие типы. Надо помнить, что используемые при решении задачи знания эксперта могут быть

не связаны с ситуацией интервью, в силу этого могут остаться неактуализированными и невербализованными. Описания концептов лучше начинать с наиболее типичных для данной предметной области (прототипов), постепенно расширяя его до конкретных представителей классов.

Прямые методы подразделяются на активные и пассивные. Активные прямые методы включают различные виды опросов, отличающиеся по форме, жесткости требований к эксперту и применяемые на разных стадиях разработки СОЗ.

Во всех активных методах инженер по знаниям использует вопросы – устные или письменные. Однако вопрос – это не только средство общения, но и способ передачи мысли и позиции инженера по знаниям. От постановки вопроса частично зависят и ответ эксперта, и его желание продолжать разговор. Вопрос может быть до такой степени неправильно поставлен, что на него невозможно дать правильный ответ.

Подготовка к общению с экспертом должна включать не только повышение эрудиции и изучение предметной области по литературным данным, но и знакомство с теорией общения, подготовку к конкретной ситуации общения. В начале общения желательно создание приятного впечатления с последующим переходом к профессиональному контакту. В процессе разговора желательно подбадривать эксперта, искренне демонстрировать свой интерес и одобрение. Экспериментально доказано, что поощрительное "хмыканье" интервьюера увеличивает длину ответов респондента.

Вопросы в беседе могут быть безличными, которые направлены на выявление общих закономерностей предметной области, и личными, касающимися непосредственного опыта

эксперта. Последний тип вопросов стимулирует мышление эксперта, "играет" на его самолюбии.

По функциям вопросы можно разделить на следующие категории:

- зондирующие – направляют рассуждения эксперта в нужную сторону,
- основные,
- контрольные, проверяющие достоверность и объективность полученной информации.

По форме вопросы разделяются на закрытые (с готовыми вариантами ответов) и открытые – без таковых. Полезно включать слегка ироничные, полусутоливые вопросы, "ломающие лед" между собеседниками, а также провоцирующие вопросы для получения спонтанных, неподготовленных ответов.

К активным прямым методам относятся:

1. Диалог, опрос с наводящими вопросами, в котором инициатива принадлежит инженеру по знаниям. Этот метод направлен на получение фактических знаний, не систематизированных в литературе. В ходе опроса определяются типы задач, решаемых экспертом, особенности предметной области, характеристики людей, получающих помощь эксперта. Начальные условия этого метода не очень жесткие, он соответствует первому этапу извлечения знаний, начальным стадиям разработки программ.

Минимальным условием для диалога является достаточный терминологический запас у инженера по знаниям. При использовании этого метода рекомендуются моменты, кажущиеся инженеру по знаниям спорными, с экспертом не обсуждать.



2. Анкетирование – наиболее стандартизованный метод. Преимуществом его является возможность для эксперта отвечать на вопросы не спеша, подумав. Метод полезен для обнаружения всех объектов предметной области, их взаимодействия, определения численных значений уверенности (вероятности). Анкета не должна быть монотонной, однообразной, вызывать скуку и усталость. Это достигается сменой формы вопросов, тематики, минимальной избыточностью анкеты, вставкой игровых вопросов.

3. Структурированный опрос является более жестким методом, в нем заранее задана конструкция разговора. Цели этого метода – определение содержания понятий, разработка моделей решения задач, обоснование выбора действий эксперта, критериев разумности его выводов, определение коэффициентов уверенности правил.

Минимальное условие использования этого метода – понимание инженером по знаниям способа решения задач.

4. Критический обзор – жесткий метод, который применяется ближе к завершению разработки. Используется для извлечения стратегий, метазнаний, поиска и ликвидации противоречивости знаний, ошибок, пробелов в знаниях.

5. Активные групповые методы – это ролевые игры, дискуссии за "круглым столом", "мозговые штурмы". Эти методы стимулируют дискуссию между участниками, близки по эффективности к критическому обзору. Для остроты дискуссии можно пригласить заведомых оппонентов, для концентрации информации ввести регламент.

Используются также ряд графических прямых активных методов инженерии знаний:

6. Моделирование потока данных – инженер рисует его во время интервью эксперта, а последний затем проверяет модель. Метод может быть использован для получения явных знаний обоих типов (декларативных и процедурных). Применение этого метода ограничено в случае непоследовательного решения задачи. При использовании метода желательно участие двух инженеров по знаниям – один опрашивает эксперта, а второй рисует поток данных.

7. Моделирование жизненного цикла объектов (документов) – во время интервью инженер рисует диаграмму взаимодействия объектов либо документов предметной области, изменения, происходящие с ними за время решения задачи. Метод используется для обоих типов знаний, позволяет построить концептуальный граф решения задачи, выявить неполноту и противоречия знаний. В нем также желательно участие двух инженеров по знаниям.

8. Построение сетей Петри (картирование действий) используется, в основном, для динамических процессов, для процедурных знаний. Вначале строится иерархия целей – подцелей – задач – подзадач с указанием действий на каждом этапе и зарисовкой диаграммы этапных решений эксперта. Сеть Петри пошагово описывает, как решается задача, каковы условия и какие существуют ограничения на переходы между этапами, включая подробные схемы каждого шага процедуры. В итоге формулируются концептуальное дерево цели и правила решения.

К пассивным прямым методам относятся:

9. Лекции. Рекомендуются на начальных этапах разработки, особенно если эксперт имеет опыт преподавателя.

10. Наблюдение инженера по знаниям за процессом решения задачи. Непременное условие этого метода – невмешательство в работу эксперта, по крайней мере, на первых порах. Этот метод является одним из наиболее "чистых" в смысле отсутствия навязывания своих представлений эксперту. Наблюдение может проводиться как за реальным процессом, так и за его имитацией. Преимущество имитации – меньшая напряженность эксперта, недостаток – его меньшая ответственность и возможность решения, отличающегося от принимаемого в реальных условиях. Рекомендуется ведение подробного протокола либо запись на видеокамеру с последующим анализом ее совместно с экспертом.

11. Самонаблюдение. В процессе решения задачи либо при воображаемом ее решении эксперт говорит вслух все, что он делает и почему. Минимальные условия применимости метода – хорошие отношения с экспертом, который должен привыкнуть говорить вслух без «внутреннего цензора». Эксперт ничем не скован, он может проявить себя максимально ярко, блеснуть эрудицией. Для многих экспертов, особенно для склонных к рефлексии, это самый приятный и лестный способ извлечения знаний. Цель метода – описание стратегии принятия решения, критериев его разумности, определение типов знаний.

В целом, чем разработка ближе к концу, тем требовательнее становится инженер по знаниям и тем жестче стиль его деловых взаимоотношений с экспертом. Для облегчения работы инженеров по знаниям был разработан ряд компьютерных программ, использующих прямой метод извлечения знаний. Наряду с ускорением и облегчением работы со знаниями, компьютерные программы имеют и недостатки: они могут ограничивать эксперта определенными рамками,

подталкивать его к представлению знаний не в том виде, в каком они у него имеются, а в том, какой удобнее реализуется в данной программе.

Косвенные (непрямые) методы получения знаний от эксперта используются, когда эксперт при всем желании не может дать исчерпывающей информации о процессе принятия решения, так как часть этой информации находится в его подсознании. Прямые вопросы в этом случае задавать смысла не имеет, эксперту предлагается решить несколько задач, и в ходе их решения знания вербализуются.

Эти методы близки к одному из направлений психологии – психосемантике, которая занимается «реконструкцией индивидуальных семантических пространств». Методы психосемантики основаны на разных формах субъективного шкалирования, т.е. количественной оценки смысловых расстояний между элементами знаний. Эксперт прямо не участвует в представлении знаний, создании сети, описании кластера и т.п. Эксперт только отмечает различия между концептами, устанавливает степень сходства между ними, описывает части предметной области. Для решения задач психосемантики был разработан ряд прикладных программ анализа знаний, основанных на обработке репертуарных решеток, многомерном шкалировании, ряде статистических методов (факторный, кластерный анализы), а также на логических (нечисленных) методах обработки знаний.

Построение семантического пространства – это переход на язык более высокого уровня абстракции. Его размерность зависит от компетентности эксперта и уменьшается с увеличением опыта и знаний. Для этого используется ряд конкретных методов:

1. Сортировка карточек – инженер по знаниям отбирает концепты предметной области из текстов, словарей, вводных разговоров с экспертом и наносит их на карточки. Эксперт затем сортирует карты по степени схожести, оговаривая критерии сортировки. Группы концептов создаются экспертом до разработки иерархии. В итоге получается иерархическая диаграмма кластеров, дерево связанных концептов, от базисных компонентов до высокого уровня абстракции. Метод подходит в основном для извлечения декларативных знаний, эффективно используется при большом количестве концептов, при потребности сделать их структуру более понятной и управляемой. Метод пригоден для систем с естественной иерархической организацией, помогает понять глобальную структуру предметной области. Однако данный способ плохо подходит для предметных областей с неиерархической структурой, требует предварительной работы по выявлению концептов, для чего инженер по знаниям должен уже хорошо ориентироваться в решении задачи.

2. Концептуальное ранжирование – распределение объектов по степени интереса эксперта к ним, придание им численного ранга. Например, имеет значение последовательность упоминания объектов экспертом при многократном их перечислении, начиная с разных объектов. С одной стороны, время и частота упоминания объекта зависят от его значимости в принятии решения, с другой – неслучайное соседство объектов в перечислении эксперта позволяет предположить существование кластеров. Объединяя выявленные кластеры в новые объекты, можно добиться выявления полной иерархической структуры предметной

области. Метод используется для извлечения декларативных знаний, выявляет скрытые структуры предметной области.

3. Множественное шкалирование – установление сходства, связей между парами объектов, создание сети с количественной оценкой (весами) дуг, для последующего анализа полученного графа. Таким образом, исходными данными для метода являются оценки экспертом попарного сходства элементов предметной области по некоторой градуированной шкале. Данный метод использует понятие расстояния, как аналогии сходства. Этот метод тесно связан с психосемантикой, это инструмент визуализации знаний, но одновременно это один из разделов прикладной статистики, использующийся для решения трех типов задач:

- Поиск скрытых переменных, объясняющих наблюдаемую структуру попарных связей.
- Сжатие исходного массива данных с минимальными потерями информативности.
- Исследование геометрических свойств системы анализируемых объектов.

4. Метод матрицы атрибутов – количественная оценка экспертом связи между каждым из набора атрибутов и каждым объектом предметной области. Матрица может затем использоваться для множественного шкалирования, кластерного анализа. Метод мало подходит для процедурных знаний, а его возможности ограничены кратковременной памятью эксперта.

5. Метод репертуарных решеток (repertory grids) предложен автором теории личностных конструктов Джорджем Келли в 1955 г. Термин "конструкт" объединяет две функции – обобщения (установление сходства) и противопоставления. Конструкт – это некоторый признак или свойство, по которому

объекты сходны между собой и, следовательно, отличны от других объектов. Это биполярные признаки, параметры, шкалы, альтернативные отношения и способы поведения.

В репертуарной решетке столбцы соответствуют объектам предметной области, а строки – конструктам. Последние имеют свой диапазон пригодности, их можно применить только к определенной области представлений человека о мире. Конструкты – не изолированные образования, характер их взаимодействия не случаен, носит системный характер.

Эксперт оценивает каждый объект по каждому конструкту. При этом объекты связаны определенным контекстом, “репертуаром” предметной области. Предполагается, что, изменяя репертуар (набор элементов), можно выявлять конструкты разного уровня общности. В качестве элементов могут быть даны некоторые условные названия (метафоры), вместо которых каждый эксперт подставляет свои объекты. Важна ориентация на собственные конструкты эксперта, а не навязывание извне. Это специфическая разновидность структурированного интервью.

Методы выявления конструктов основаны на выявление сходств – различий элементов. В типичном случае предъявляются триады, с инструкцией указать два связанных элемента, свойство, по которому они связаны и свойство, по которому третий элемент им противостоит. Так выявляются полюса конструкта. Количество предъявляемых триад не ограничено, да и предъявлять можно не три элемента. Развитием метода могут служить вопросы об отношении эксперта к данному конструкту, позволяющие проанализировать более высокий уровень знаний.

Для группировки конструкторов можно использовать кластерный анализ, выявить иерархию. Конструктор – некоторая ось, относительно которой располагаются подмножества элементов, количественно связанных с ним. Для сравнения разных конструкторов используют вариант метода главных компонент, последовательно анализируя проекции конструкторов на оси, скомпонованные из элементов. Это позволяет выявить взаимосвязи конструкторов и элементов.

6. Метафорический подход является косвенным методом для выявления скрытых предпочтений. Большинство методов инженерии знаний ориентировано на верхние (вербальные или вербализуемые) уровни знаний. При оценке чего-либо (отнесения объекта к классу, определения сходства между объектами) эксперт настраивается на необходимость доказательств своего ответа в терминах объективных свойств. Метафора (сравнение с объектом некоторого мира, который несопоставим с изучаемым объектом по своим свойствам) работает как фильтр, не выделяя свойства объекта, а указывая на возможное отношение к нему, к некоторым его характеристикам. Это игра, раскрепощающая сознание эксперта, катализатор интервью. Результаты метафорического подхода также могут быть обработаны методами многомерного шкалирования и т.п.

В целом для извлечения **процедурных** знаний требуется меньше формализации, больше используются критический обзор, наблюдение за работой эксперта, самоотчет эксперта, мысли вслух, различные варианты графического представления решения задачи.

Для извлечения **стратегических знаний** хорошо подходит «взгляд сверху»:



- варианты критического обзора с акцентом на неординарные ситуации,
- подробный разбор фактов, принципиально влияющих на ход решения,
- разбиение предметной области на подобласти (домена на части),
- построение графа решений, сети целей,
- анализ потребностей пользователя.

При наличии более одного эксперта возникает проблема согласования группового выбора. Совместная работа нескольких экспертов может увеличивать, а может и снижать эффективность их деятельности. Интеллектуальная деятельность людей во многом зависит от внутренних и внешних условий. На ход экспертизы могут повлиять личная заинтересованность и качества эксперта (самолюбие, конформизм, взаимоотношения с другими участниками работы), конкуренция между экспертами, степень ответственности за результаты экспертизы. Анонимность экспертов может оказаться полезной для свободы критики и ее принятия, устранения влияния личных амбиций и взаимоотношений. Групповой выбор не является критерием истины, это лишь способ выработки общего мнения экспертов.

При невозможности количественной оценки альтернатив самым распространенным способом группового выбора является голосование. Однако в голосовании есть возможность отказа от принятия решения, который в реальной жизни может быть недопустим. В этом случае используются приемы, минимизирующие количество ситуаций отказа. Допустим, что два эксперта равной компетентности делают противоположный выбор между альтернативами “а” и “b”. Можно ввести

дополнительные альтернативы, например “с” и “d”, и предложить экспертам расположить весь ряд в порядке предпочтительности. Если ряд первого эксперта окажется “с, d, a, b”, а ряд второго “b, d, c, a”, то можно считать, что точка зрения второго эксперта более обоснована.

В случае невозможности принятия решения консенсусом могут помочь максимально четкое, формальное описание альтернатив и принятие всеми теста их эффективности, т.е. максимальная алгоритмизация процедуры. Полезен также бывает переход к более слабым шкалам – порядковой и шкале наименований. При качественных оценках можно использовать порядковую шкалу с согласованными точками отсчета, с детальными словесными формулировками градаций. Измерение при этом сводится к определению принадлежности к классу шкалы или к промежутку между классами. Градации на шкале определяются потребностью лиц, проводящих измерения, и возможностью различать эти градации. Такой подход довольно примитивен, но надежен. Принуждение людей к количественной оценке неопределенности может вести к ошибочным результатам, люди используют сравнительные вероятности гораздо чаще, чем их количественную оценку.

Особый интерес представляет непосредственное изучение распределения оценок экспертов, в ходе которого можно обнаружить как кластеры близких оценок, так и отдельные оценки, далеко отстоящие от основной массы. Выяснение причин сходства между первыми и различий между вторыми может дать новые критерии оценки альтернатив.

Если альтернативы можно оценить количественно, применить единственный критерий выбора, то решение каждого эксперта рассматривается как оценка некоторого истинного

значения критерия данной альтернативы, а для принятия решения используется статистика, например выборочное среднее оценок экспертов. Если нам известны оценки степени доверия каждому из экспертов, то на практике используется несколько способов для определения общего результата экспертизы:

1. Использование степени доверия к эксперту как веса его оценки, например умножение оценки на вес, потом суммирование оценок всех экспертов и вычисление средней.

2. Вычисление средней оценки в группах экспертов, разбитых по степени доверия к ним. Например, в случае варьирования доверия от 0 до 1, границами групп могут быть оценки доверия от 0,00 до 0,30, от 0,31 до 0,70, от 0,71 до 1,00). Затем средние оценки доверия к экспертам данной группы используются как весовые коэффициенты при вычислении общей средней.

3. Определение дисперсии средней оценки как меры доверия к ней:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i,j}^n \{[s(i) - s(j)] * [c(i) + c(j)]\}}{n * (n - 1) / 2}$$

где  $n$  – количество экспертов,  $s(i)$  – оценка эксперта,  $c(i)$  – степень доверия  $i$ -му эксперту.

При любом подходе к проблеме выбора переход к «диктатуре» бывает не только возможен, но и необходим. В этом случае ответственность за выбор берет на себя более опытный и авторитетный эксперт.

### **3.3. Модели представления знаний**

Проблема хранения, накопления и использования знаний является исключительно важной. В силу своих отличий знания и данные реализуются в компьютере различным образом. Данные хранятся в виде баз данных, а знания в виде компьютерных программ или баз знаний.

Представление знаний в компьютере в той или иной мере отражает все признаки, характеризующие знания. В основе компьютерной базы знаний всегда лежит определенная модель представления знаний, а способ их обработки определяется способом их хранения. От выбранной модели представления знаний зависит способ принятия решений. Это существенно отличает знания от данных, выбор способа обработки которых в первую очередь определяется решаемой задачей и имеющимися алгоритмами.

Каждая из моделей представления знаний является языком изложения интенциональной информации. Любой язык характеризуется:

- алфавитом, т.е. множеством символов, которые допустимо использовать,
- синтаксисом, т.е. множеством правил расположения слов и символов в предложениях и формулах,
- семантикой, т.е. множеством правил, определяющих способы поиска смысла знаков, слов и предложений.

Модели представления знаний также включают три приведенные выше множества.

Оптимальное представление знаний позволяет избежать многих проблем при разработке программ, использующих

знания, а выбор способа представления – одна из важнейших задач в работе инженера-когнитолога. Обычно при представлении знаний используется одна или несколько из четырех основных моделей: логическая, продукционная, модель фреймов и семантические сети.

### 3.3.1. Логическая модель

В определенном смысле язык логической модели является частью обычного разговорного языка. Однако это часть, включающая только четко определенные синтаксические и семантические правила, оперирующая легко формализуемыми объектами. Наиболее распространенной логической моделью является логика предикатов с соответствующим языком предикатов.

В алфавите логики предикатов присутствуют несколько групп символов.

1) Символы, соответствующие элементам знаний в предметной области (константы, переменные, функции, которые определяют новые сущности через список аргументов). Выражения, включающие только константы, переменные и функции, называются термами.

2) Символы, соответствующие свойствам элементов знаний и отношениям между ними (предикаты). Предикат является логической функцией и принимает два значения  $I = \{T(\text{истина}), F(\text{ложь})\}$  в зависимости от значений аргументов.

Предикаты в основном описывают взаимоотношения термов и их свойств, т.е. имеют отношение к структуре объектов, а не к структуре предметной области. В качестве аргументов предикат может содержать константы, переменные, функции и предикаты. Обычно для представления знаний

используется логика предикатов первого порядка, в рамках которой предикаты в качестве аргументов не допускаются.

Смысл предикатных символов определяется произвольно и указывается следующим образом. Например, предикат  $P$ , обозначающий отношение близкого родства двух людей, обозначенных символами  $a$  и  $b$ , можно указать так:

$P : P(a, b) = "T"$ , если  $a$  и  $b$  являются сибсами или один из них родитель другого.

Аналогично предикат РЕЙТИНГ, интерпретируемый как попадание студента в группу отличников, примет следующие значения:

РЕЙТИНГ ( $A, 80$ ) = "T", если студент  $A$  имеет рейтинг больше 80,

РЕЙТИНГ ( $A, X$ ) = "T", если студент  $A$  имеет рейтинг больше порога  $X$ ,

РЕЙТИНГ ( $A, f(x)$ ) = "T", если студент  $A$  имеет рейтинг больше некоторой функции, описывающей пороговый уровень рейтинга в зависимости от курса обучения, пола и возраста.

3) Специальные символы, которые используются для формирования сложных предложений в языке предикатов, аналоги союзов и других частей речи естественного языка. Синтаксически правильное сложное предложение, составленное с помощью специальных символов, является сложной логической формулой. Количество символов ограничено, что приводит к ограниченным описательным возможностям языка предикатов, но устраняет многозначность интерпретации и облегчает компьютерную обработку.

Логические связи используются для формулирования в языке предикатов сложных предложений из простых и задаются с помощью трех основных символов:

$\neg$  - отрицание       $(\neg A$  - «не верно, что A»)

$\wedge$  (&) - конъюнкция       $(A \wedge B$  - «A и B»)

$\vee$  - дизъюнкция       $(A \vee B$  - «A или B»)

Следующие два символа не являются основными и могут быть представлены через указанные выше логические связки.

$\leftrightarrow$  – эквивалентность («A эквивалентно B» в смысле истинности или ложности). Это выражение соответствует более сложной записи  $(\neg A \vee B) \wedge (\neg B \vee A)$ .

$\rightarrow$  – импликация («ЕСЛИ A, ТО B», «A влечет B»). Выражение истинно, когда истинны A и B либо когда A ложно. В первом случае истинность выражения понятна. В случае, когда «A» ложно, выражение ЕСЛИ A, ТО B не определено. В логике такая нечеткость недопустима, поэтому оно доопределяется указанным выше способом.

Установление истинности сложного выражения, содержащего логические связки, производится с помощью так называемой таблицы истинности (буквами "Т" и "F" обозначены соответственно «истина» и «ложь»):

A	B	$A \wedge B$	$A \vee B$	$A \rightarrow B$	$A \leftrightarrow B$
Т	Т	Т	Т	Т	Т
Т	F	F	Т	F	F
F	Т	F	Т	Т	F
F	F	F	F	Т	Т

С помощью кванторов в языке предикатов формулируются какие-либо общие утверждения. Обозначаются кванторы следующими символами:

$\forall$  – квантор общности.  $(\forall a)P(a)$  означает "для всех a выполняется формула P(a)". При подстановке вместо

переменной «а» любого символа (например, d), соответствующего конкретному объекту реального мира, формула  $P(d)$  равна значению «истина».

Например, утверждение «все больные по крайней мере один раз в жизни предъявляли жалобы на свое здоровье» можно записать как:

$$(\forall a) \text{ЖАЛОБЫ}(a),$$

где ЖАЛОБЫ – предикатный символ, означающий их предъявление.

$\exists$  – квантор существования.  $(\exists a)P(a)$  означает «существует такое а, для которого выполняется формула  $P(a)$ », т.е. существует по крайней мере один случай истинности формулы  $P(a)$ , как минимум один объект г, при подстановке которого  $P(g) = "Г"$ .

Например, утверждение «существует человек, который ничем не болеет» можно записать как:

$$(\exists x) \text{ЗДОРОВ}(x).$$

Переменные, входящие в формулу с кванторами, называются связанными, не связанные кванторами переменные называются свободными. Порядок применения к переменным кванторов соответствует обычному направлению чтения текста – слева направо.

Например, рассмотрим предикат ЛЕЧЕНИЕ (x, y), описывающий отношение «заболевание x лечится препаратом y». Тогда, применяя кванторы, можно записать следующие формулы:

$(\forall x)(\forall y) \text{ЛЕЧЕНИЕ}(x, y)$  – означает «любую болезнь можно вылечить чем угодно»;

$(\exists x)(\forall y) \text{ЛЕЧЕНИЕ}(x, y)$  – означает «эту болезнь можно вылечить любым препаратом»;



$(\forall x)(\exists y) \text{ЛЕЧЕНИЕ}(x,y)$  – означает «этот препарат – панацея от всех болезней»;

$(\exists x)(\exists y) \text{ЛЕЧЕНИЕ}(x, y)$  – означает «существует болезнь, которую можно вылечить этим препаратом».

Символы алфавита языка предикатов используются в соответствии с синтаксическими правилами. Эти правила просты и во многом соответствуют правилам естественного языка – первоначальное выполнение действий в скобках, прочтение формул слева направо, заключение в скобки кванторов со связанными переменными и т.п.

Любое выражение, состоящее из конечного числа символов алфавита, в языке предикатов называется логической формулой и соответствует обычному предложению. Еще одним базовым понятием языка предикатов является понятие *атома (атомарной формулы)*, который соответствует простому нераспространенному предложению разговорного языка. Атом – это выражение, включающее константы, переменные, функции и, в отличие от терма, предикаты. Правильно построенная формула состоит из атомарных формул или других правильно построенных формул, соединенных логическими связками в соответствии с синтаксисом языка предикатов.

Если все переменные в формуле связаны кванторами, то ее можно вычислить, т. е. узнать ее истинность или ложность. Однозначно оценить истинность логических формул, содержащих свободные переменные, можно только, подставив конкретные значения вместо этих переменных.

Логика предикатов изначально не связана с предметной областью. Семантика логики предикатов – это внесение смысла в абстракцию модели путем сопоставления ее элементов с реалиями окружающего мира. Установление соответствия

между элементами языка предикатов и элементами предметной области (отображение знаний) называется интерпретацией.

Каждой константе ставится в соответствие некоторый объект или значение атрибута, а каждому предикатному символу – одно из значений множества  $I = \{\text{«истина»}, \text{«ложь»}\}$ , характеризующего истинность или ложность соответствующего утверждения в данной предметной области. Сущностью языка предикатов является возможность оценки значения логических формул на основе ранее оцененных формул, т.е. получение заключений из посылок.

Значения формул оцениваются в соответствии со следующими правилами:

- Если истинность логических формул  $A$  и  $B$  известны, то значения формул  $\neg A$ ,  $A \vee B$ ,  $A \wedge B$ ,  $A \rightarrow B$ ,  $A \leftrightarrow B$  оцениваются по таблице истинности.
- Если для всех констант формула  $F(x)$  оценена как «истина», то истинной является формула  $(\forall x) F(x)$ .
- Если хотя бы для одного значения  $x$  формула  $F(x)$  истинна, то формула  $(\exists x) F(x)$  тоже истинна.

В логике предикатов обеспечивается автоматическая процедура дедуктивного вывода (получение заключения, доказательство теорем) путем применения правил вывода к исходной группе формул. Для этого в модель добавляется еще одно множество – аксиом, т.е. формул, истинных при любой интерпретации. Эти формулы часто используются в качестве исходных при вычислении истинности других формул.

В логической модели грань между данными и знаниями лежит на уровне логической сложности: данные не сложнее предикатов, а знания соответствуют формулам с кванторами и

логическими связками. Достоинствами модели являются непосредственное программирование механизма вывода как вычисления значений сложных логических функций, по которым из известных знаний можно получить новые, четкая логика и семантика.

Однако последнее свойство является одновременно и недостатком. Записать знания в виде логических формул не удается в тех случаях, когда затруднен выбор констант, предикатов, функций, или же возможности представления в логике предикатов недостаточны для описания знаний. Это может быть связано, например, с нечеткостью естественного языка, которая в медицинских предметных областях встречается очень часто. Четкая логика человеку вообще несвойственна. Кроме того, ограничения имеет и логика предикатов первого порядка, так как часто представление знаний требует использования предикатов в качестве переменных, т.е. переход к предикатам второго порядка.

### **3.3.2. Продукционная модель**

Продукционную модель как способ представления знаний впервые предложил Э.Пост в 1943 г. Основу этой модели составляет множество так называемых *продукций* (*продукционных правил*). Правила обеспечивают способ представления выводов, рекомендаций, указаний, стратегий. Представление в виде правил часто используется в тех предметных областях, где значительная часть знаний основана на опыте специалистов, эмпирических закономерностях и ассоциациях.

Можно предложить следующую классификацию продукционных правил:

- идентификационные – используются для определения объектов,
- причинные – связывают посылку и действие,
- локальные – используют дефиниции раздела базы знаний для обеспечения связи между гипотезами,
- глобальные – регулируют работу всей системы и получение вывода,
- мировых фактов – основаны на эрудиции и здравом смысле.

Продукционная модель использует логику "из ситуации следует действие" и представляет систему правил вида "Если..., То...". Очевидно, что каждое правило состоит из двух частей, которые представляют собой взаимосвязанные пары типа «Если ситуация – То действие», «Если посылка – То заключение», «Если причина – То следствие».

Первая часть этих пар называется антецедент (посылка). Антецедент включает элементарные предложения, соединенные логическими операторами И, ИЛИ. Посылка является образцом, указывающим ситуацию, в которой правило должно сработать, условия, которые могут трактоваться как причины, факты и т.п. Вторая часть продукционных правил – заключение (консеквент) – содержит решение или действия, подлежащие выполнению.

Таким образом, в продукционной модели знания предметной области представлены множеством правил, которые проверяются на множестве известных фактов. Когда левая часть правила соответствует фактам, то действие или решение, содержащееся в правой части, выполняется. Это действие может состоять и в добавлении нового факта в базу фактов, который затем может быть использован для сопоставления с левыми частями других правил. Таким способом формируется цепочка сработавших правил.

Синтаксисом продукционной модели является общий вид правила. Кроме описанной выше пары посылка=>заключение, которая называется также ядром продукции или секвенцией, с правилом могут быть связаны дополнительные параметры:

- имя продукции, идентифицирующее ее в базе правил, иногда несущее и смысловую нагрузку,
- область применения правила, т.е. указание на принадлежность продукции к какому-либо подмножеству,
- условие применимости ядра продукции, которое часто является предикатом, и от истинности которого зависит возможность применения правила,
- постусловие продукции, которое актуализируется только в том случае, если ядро продукции реализовалось. Постусловия описывают действия и процедуры, которые необходимо выполнить после реализации консеквента, например, изменить определенным образом какой-либо параметр.

Отдельного рассмотрения в продукционной модели заслуживают коэффициенты уверенности. Это величины вероятностной природы, заимствованные из нечеткой логики, изменяющиеся от 0 до 1 и определяемые экспертно. С одной стороны, редко можно с уверенностью сказать, что правило «Если..., То...» верно. С другой стороны, пользователь также не может быть полностью уверен в корректности вводимых данных. Поэтому коэффициенты уверенности (КУ) бывают двух видов:

- Для данных, вводимых в антецедент правила (оценивают нашу уверенность в правильности этих данных). На КУ данных очень сильно влияет опытность врача, его состояние, условия, в которых получены данные и т.п.

- Для секвенции правила (оценивают нашу уверенность в правильности утверждения ЕСЛИ – ТО).

КУ для продукции в целом рассчитывается по определенным правилам. Например, продукция проста и выглядит следующим образом:

ЕСЛИ отсутствует зрачковая реакция на свет

И отсутствует пульс

ТО пациент мертв.

КУ для секвенции правила 0,9, для зрачковой реакции 0,8, для пульса 1,0.

При соединении данных в посылке продукции через логический оператор "И" выбирается минимальный КУ данных и умножается на КУ секвенции, т.е. для данного правила  $KУ=0,8*0,9=0,72$ . Это наша уверенность в смерти пациента при отсутствии зрачковой реакции и пульса. Если в antecedенте продукции имеется оператор ИЛИ, то выбирается максимальный КУ для данных и вновь умножается на КУ секвенции. В этом случае КУ правила составил бы 0,9.

В цепочке вывода КУ вычисляются как независимые, хотя таковыми не всегда являются, и это является теоретической проблемой использования коэффициентов уверенности.

КУ могут служить ограничителем работы СОЗ. Часто для них заранее задаются граничные значения, и вывод считается верным только при их превышении. В базе знаний могут присутствовать правила, содержащие в правой части одинаковые выводы, т.е. правила с независимым доказательством вывода. Срабатывание таких правил увеличивает надежность вывода. При работе с базой знаний КУ накапливаются при получении одинаковых выводов, и работа прекращается при достижении граничного значения. Например,

в системе MYCIN (одна из самых первых и знаменитых СОЗ) используется следующая схема. Если имеются два независимых доказательства одного факта, то  $KY = KY_1 + KY_2 - KY_1 * KY_2$ . Если имеется более двух независимых доказательств, их можно комбинировать попарно, при этом последовательность комбинации не имеет значения.

Существует некоторый теоретический фундамент для использования коэффициентов уверенности, т.е. для обработки нечеткой информации – теория Демпстера-Шефера. Основное отличие этой теории от теории вероятностей – возможность обработки незнания, допущение его существования.

В теории вероятностей свидетельство, не поддерживающее гипотезу, отрицает ее, поскольку незнание не допускается. При отсутствии априорного знания вероятность события предполагается  $1/N$ , где  $N$  – число возможных исходов. В теории Демпстера-Шефера используется концепт «масса», который обозначает доверие к событию. Аналогия подчеркивает отношение к доверию, как к осязаемой величине, которую можно добавить, слепить из кусков и т.п. Дополняющая массу до 1 величина не рассматривается как недоверие (вероятность иного события) и не присваивается ничему. Это некий резерв, который может быть в дальнейшем снова исследован.

Работу систем продукций можно представить как процесс поиска, в котором правила подвергаются испытанию до тех пор, пока некоторая их последовательность не породит базу данных, удовлетворяющую наблюдаемым фактам. Механизм, используемый как средство вывода в продукционной системе, имеет функции поиска в базе знаний, последовательного выполнения операций над знаниями и получения заключений.

Основой построения вывода в продукционной модели служат два принципа:

- Modus ponens означает, что если истинно А и существует утверждение "ЕСЛИ А, ТО В", значит истинно В.
- Гипотетический силлогизм означает, что если заключение одного правила является посылкой другого, то можно записать третье правило с посылкой из первого и заключением из второго. Например, известно, что ЕСЛИ Х, ТО У, а также, что ЕСЛИ У, ТО Z, то можно записать ЕСЛИ Х, ТО Z.

Важный вопрос при использовании продукционной модели – выбор метода поиска решения, или стратегии вывода, от которой зависит порядок применения правил. Фактически это семантика продукционной модели, которую можно представить в виде графа (дерева). Вывод – поиск пути на этом графе, поиск совокупности правил, поддерживающих отдельное заключение, и данных, на основании которых делается вывод. Движение по графу может происходить в одном из двух направлений – от фактов к заключению либо от заключения к фактам. В последнем случае заключение является проверяемым предположением.

Соответственно в продукционной модели применяется два основных типа выводов:

1. Прямой (управляемый данными, восходящий). В этом выводе первична проверка антецедента на соответствие данным, т. е. поиск заключения по данным. При этом порождается прямая цепочка рассуждений. Поиск новой информации (добавление новых фактов) происходит в направлении секвенций, разделяющих левые и правые части правил. Система использует информацию из левых частей, чтобы вывести информацию (или произвести действия),



содержащуюся в правых частях. Однако, не все факты являются независимыми, а многие из них не относятся к рассматриваемой проблеме. Поэтому для прямого вывода характерно большое количество данных и работающих правил, не имеющих прямого отношения к заключению.

2. Обратный (управляемый консеквентами, нисходящий). В этом выводе первично выдвижение гипотезы, проверяемой на соответствие данным. При этом порождается обратная цепочка рассуждений. Система начинает с определения того, что необходимо доказать (например, установить существование какого-либо факта), и принимает его за подцель. Затем происходит проверка выполнения тех правил, в правой части которых имеется факт, который необходимо установить.

Обратный вывод позволяет, прежде всего, избежать комбинаторного взрыва числа возможных цепочек, так как лишь в немногих случаях заключения можно заранее предвидеть и как-то ограничить перебор вариантов. Обратный вывод экономнее, при нем из рассмотрения исключаются правила, не имеющие отношения к цели.

При двунаправленном выводе сначала оценивается небольшой объем данных и выбирается гипотеза (как в прямом выводе), затем запрашиваются данные, необходимые для принятия решения (как в обратном выводе).

И в прямом, и в обратном выводе может быть реализован поиск в глубину либо в ширину.

- При поиске в глубину в качестве очередного правила выбирается то, что соответствует более детальному уровню описания решаемой задачи, т.е. начав проверку какой-либо

гипотезы, система проверяет ее до подтверждения или опровержения.

- Поиск в ширину означает первоначальный анализ всех признаков одного уровня, с «послойной» проверкой всех гипотез одновременно.

Различают два основных режима работы механизма организации вывода: безвозвратный и пробный. В первом режиме управления выбирается применимое правило и используется необратимо, без возможности пересмотра в дальнейшем.

В пробном режиме управления выбирается применимое правило (либо произвольно, либо на каком-то разумном основании); это правило используется, но резервируется возможность впоследствии заново вернуться к этой ситуации, чтобы применить другое правило. В режиме с возвращением при выборе правила определяется некоторая точка возврата. Если последующие вычисления приведут к трудностям в построении решения, то система переходит к предыдущей точке возврата, где применяется другое правило, и процесс продолжается. В другом типе пробного режима, который называют управление с поиском на графе, предусмотрено запоминание результатов применения одновременно нескольких последовательностей правил. Здесь используются различные виды структур графов и процедур поиска на графе.

При выполнении условия применимости ядер продукции более чем для одного правила возникает проблема: какую продукцию в данной ситуации лучше актуализировать? Другими словами, происходит генерация конфликтного набора правил. Возможны два пути решения этой задачи, которая возлагается на систему управления. При централизованном

управлении решение об актуализации продукции принимается специальной системой управления, а при децентрализованном определяется складывающейся в этот момент ситуацией. Если порядок выполнения продукции важен, то в продукциях должна содержаться информация о требованиях к этому порядку. Если в постусловиях продукции указывается имя продукции, которая должна выполняться после данной, система продукции превращается в обычную компьютерную программу, т. е. реализует некоторый алгоритм.

Опишем несколько алгоритмов выбора правила для актуализации.

1. “Стопка книг”. Алгоритм основан на предположении, что наиболее часто используемая продукция является наиболее полезной. Готовые продукции как бы образуют “стопку”, в которой порядок определяется накопленной частотой использования продукции в прошлом. Подобный принцип управления особенно хорош, когда частота исполнения подсчитывается с учетом ситуаций, в которых использование продукции привело к положительному результату.

2. Критерий длины условия. Заключается в выборе из фронта готовых продукции той, у которой стало истинным наиболее “длинное” условие выполнимости ядра. Этот критерий опирается на то, что частные правила, относящиеся к узкому классу ситуаций, важнее общих правил, относящихся к широкому классу ситуаций, так как первые учитывают больше информации о ситуации, чем вторые.

3. Использование метапродукций. Основан на идее ввода в систему специальных метапродукций, задачей которых является организация управления при возможности неоднозначного выбора из фронта готовых продукции.

4. Принцип приоритетного выбора. Связан с введением статических или динамических приоритетов на продукции. Статические приоритеты могут формироваться а priori на основании сведений о важности производственных правил в данной проблемной области. Эти сведения, как правило, представляют собой информацию, получаемую от эксперта. Динамические приоритеты вырабатываются в процессе функционирования системы производств и могут отражать, например, такой параметр, как время нахождения продукции во фронте готовых производств.

5. Управление по условиям. Разрешение конфликта между правилами производится за счет установки ограничений на включение правил в конфликтный набор (по именам, условиям выполнения правил, разбиению базы знаний на подобласти, запрет на включение определенной условной части правила и т.п.). Разбиение базы знаний возможно по уровню знаний, к которому имеют отношение правила (например, диагноз – синдром – симптом).

Итак, производственная модель содержит три основных компонента:

- Рабочая память (база данных).
- База правил.
- Механизм сопоставления правил и данных (машина вывода).

Производственную модель представления знаний лучше применять в хорошо разработанных предметных областях с твердыми концепциями, не рекомендуется использовать при большом объеме знаний, для задач, сложных по постановке или по характеру решения.

Производственная модель широко используется в

экспертных системах. К ее преимуществам можно отнести:

- модульность (независимость правил друг от друга), и, как следствие,
- легкую модифицируемость (локальность каждого изменения),
- универсальность (подавляющая часть человеческих знаний может быть записана в виде продукций, при необходимости в системе продукций можно реализовать любые алгоритмы, отразить любое процедурное знание)
- доступность чтению и пониманию неспециалистами (важно при проверке и при работе с экспертами),
- легкость самообъяснения рассуждений (прослеживание цепочки выводов),
- эффективность (доказано практическим использованием систем, основанных на продукционной модели).

Однако при использовании продукционной модели приходится преодолевать ряд трудностей:

- единый громоздкий формат записи всех правил, не соответствующий элементам знаний эксперта, т.е. принципиальное отличие синтаксиса продукционной модели от структуры знаний человека,
- сложность оценки целостного образа знаний,
- неясность взаимных отношений правил,
- сложность проверки непротиворечивости системы продукций при большом их числе,
- низкая эффективность обработки, отсутствие гибкости вывода.

Основной проблемой продукционных систем является скорость поиска необходимой продукции в их множестве. Время, затрачиваемое на проверку истинности условий,

является второй серьезной проблемой. Именно для ускорения этих процессов в продукцию вводятся дополнительные параметры (имя продукции, область ее применения). Однако далеко не всегда этого бывает достаточно, и скорость работы производственных систем остается серьезным ограничением их применения. Стратегическим решением этой проблемы являются уменьшения числа обращений к правилам и оптимизация механизма вывода.

Производственным моделям не хватает строгой теории, в них царит эвристика. Причина неудач создания теории кроется в расплывчатости понятия продукции и интерпретации ядра, а также в различных способах управления системой продукции. Переход к алгоритмической схеме мало что дает, так как при этом исключается основное свойство производственных систем – их модульность – и возможные в силу этого асинхронность и параллельность выполнения продукции в системе.

### **3.3.3 Модель фреймов**

Эта модель позволяет хранить иерархию знаний в явном виде. В самом общем смысле, фрейм – структура для описания стереотипной ситуации, состоящая из характеристик этой ситуации, называемых слотами, и их значений. Такая структура составляет синтаксис модели фреймов, который весьма прост и универсален.

Теория фреймов имеет корни в психологическом объяснении понимания окружающего. В концепции М. Минского (1975), новая информация должна быть увязана с уже имеющимися концептуальными объектами, для каждого из которых в памяти человека определены некоторые рамки. В этой модели знания человека представлены относительно большими единицами со сложной внутренней структурой,

которые и называются фреймами. "Когда человек попадает в новую ситуацию или радикально меняет свое отношение к старой, он вызывает из памяти основную структуру, именуемую фреймом. Это единица представления знаний, заполненная в прошлом, детали которой при необходимости могут быть изменены согласно текущей ситуации. Каждый фрейм может быть дополнен информацией о способах его применения, последствиях этого применения, действиях, которые надо выполнить в определенных ситуациях".

Формально структуру фрейма можно представить как:

$F(\langle N_1, V_1 \rangle, \langle N_2, V_2 \rangle, \dots)$ , где  $F$  – имя фрейма,  $N_i$  – имя  $i$ -го слота,  $V_i$  – значение  $i$ -го слота. Имя фрейма должно быть уникально в данной фреймовой системе. Имя слота уникально в пределах фрейма, но может быть одинаковым в разных фреймах. Число слотов произвольно, но обязательно есть слот, показывающий фрейм-родитель и слот с перечнем дочерних фреймов.

Каждый слот в качестве значения может содержать не только числовую или символьную константу, но и:

- имя какой-либо процедуры, позволяющей вычислить это значение,
- продукционное правило, с помощью которого можно найти это значение,
- ссылку на другие фреймы, другие слоты того же фрейма,
- присоединенную процедуру (программу процедурного типа, приказ на выполнение которой и является значением слота).

Кроме этого, фрейм может включать дополнительные компоненты:

1. Указатели наследования. Эта компонента показывает, какую информацию о значениях слотов верхнего уровня

наследуют слоты нижнего уровня с такими же именами, например, «значения такие же», «в установленных границах», «не зависят» и т.д. В качестве указателей могут быть использованы разные типы связей:

- "IS-A" означает включение или совпадение понятия. Фрейм или слот, а в общем случае объект нижнего уровня содержит в основном все атрибуты верхнего. Это свойство называется наследованием атрибутов между уровнями иерархии.
- "PART-OF" показывает отношения между экземплярами класса, его внутреннюю структуру. Объект нижнего уровня является частью верхнего, наследуя определенную часть его свойств.
- "KIND-OF" – объект нижнего уровня является разновидностью верхнего, частично наследуя его свойства.
- "INSTANCE-OF" специально вводится для разграничения прототипов и экземпляров, т.е. разграничения общей структуры и конкретного описания.

2. Указатель типа данных слота (число, указатель другого фрейма, текст, специальный символ и т.п.).

3. Демон – процедура, автоматически запускаемая при выполнении некоторого условия, например, при обращении к некоторому слоту.

Примером может служить фрейм «Ожоговая болезнь»:

Имя фрейма: ОЖОГОВАЯ БОЛЕЗНЬ

Слот: СТЕПЕНЬ БОЛЕЗНИ

Значения: 1-я степень, 2-я степень, 3-я степень

Слот: ТЕМПЕРАТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА



Значения: Утренняя, Дневная, Вечерняя  
температура

Слот «температурная характеристика» может и существовать как слот нижнего уровня в любой степени ожоговой болезни, а может быть и отдельным фреймом, описывающим метод оценки температурной характеристики. Значениями этих слотов могут быть как конкретные значения температуры, так и указания, каким способом и в какое время ее измерять.

Если из фрейма убрать все значения слотов, оставив только их имена, то мы получим конструкцию, называемую прототипом фрейма. Такой фрейм, как структурированный набор компонентов ситуации, даже без значений слотов хранит знания о предметной области. При заполнении значений слотов он превращается в конкретный фрейм явления или события и называется фреймом-примером или фреймом-экземпляром.

Можно выделить две разновидности фреймов, предназначенные для представления разных типов знаний. Фреймы-описания содержат декларативные знания, именами слотов являются названия характеристик или свойств объекта, а в слотах содержатся значения этих характеристик. Ролевые фреймы создаются для представления процедурных знаний, в них в качестве слотов выступают действия с инструкциями по их выполнению, задания теста, ответы на которые являются значениями слотов и т.п.

Пример фрейма-прототипа, фрейма-описания пролапса митрального клапана:

Имя фрейма:	ПРОЛАПС МИТРАЛЬНОГО КЛАПАНА	Значения
Слоты:	ФИО	
	Возраст	
	Пол	
	Конституциональные особенности	
	Предшествующие заболевания	
	Сопутствующие заболевания	
	Дисфункция вегетативной нервной системы	
	Аускультация сердца	
	ЭКГ	
	Эхокардиография	
	Баллистокардиография	
	Общий анализ крови	
	.....	
	Фрейм-аналогия	

Пример ролевого фрейма-экземпляра:

Имя:	ПРОВЕСТИ АУСКУЛЬТАЦИЮ МИТРАЛЬНОГО КЛАПАНА	
Слоты:	Выбрать оптимальное положение прослушивания	Стоя, сидя на корточках
	Выбрать оптимальные области прослушивания	Эпицентр – область верхушки сердца, проведение – левая подмышечная область
	Зафиксировать наличие систолического шума	Есть
	Зафиксировать отношение шума к систоле	Позднесистолический
	Провести пробу с нитроглицерином	Усиление аускультативных феноменов

Структурированность и связность знаний в модели фреймов достигается за счет указателей наследования и ссылок на другие слоты и фреймы. Специальные механизмы обеспечения вывода в модели фреймов отсутствуют, он реализуется с помощью различных процедур. Получение вывода (семантика модели) обеспечивается:

- демонами,
- присоединенными процедурами,
- ссылками,
- механизмом наследования свойств фреймов.

Можно выделить типичные этапы построения модели фреймов:

1. Выбор базовых фреймов для наиболее важных объектов предметной области. На их основании в последующем строятся фреймы для новых состояний объектов, в которых могут использоваться уже имеющиеся части других фреймов.

2. Построение набора слотов в соответствии с целями создания модели.

3. Установление иерархической структуры за счет связей между слотами разных уровней. Информация об атрибутах фрейма верхнего уровня частично используется фреймами-потомками.

4. Установление связей между фреймами, описывающими с небольшими различиями разные объекты или разные аспекты одного объекта. Сложные объекты обычно описываются комбинацией фреймов, сетью фреймов, которая является иерархической структурой с отношениями типа "абстрактное–конкретное», "часть–целое". Разные фреймы могут иметь общие слоты, через них возможно связывание информации, полученной с разных точек зрения. Общие слоты очень полезны при обосновании выбора фрейма для описания ситуации. Фрейм принимается при условии полного согласования, отсутствии противоречий со всеми связанными фреймами.

5. Слоты (терминалы фрейма) обычно заполняются значениями по умолчанию, хотя бы приблизительными. Если у нас нет данных о значении некоторого слота, мы используем предшествующий опыт работы, данные литературы и т.п. Поэтому, даже когда информация о ситуации неполная, фрейм достаточно информативен. При поступлении точной

информации имеющиеся по умолчанию значения слотов заменяются на реальные. Кроме того, значения по умолчанию могут использоваться в качестве логических ограничений поступающих значений слотов, могут не заменяться ими в тривиальных ситуациях, экономя ресурсы. Этот подход сходен с процедурой распознавания, когда видна только часть образа. Невидимую часть мы мысленно реконструируем, воображаем пусть не совсем точно, но достаточно для узнавания.

Таким образом, в модели фреймов в явном виде вводится иерархическая структура, основанная на различной степени абстракции характеристик объектов и ситуаций. Эта модель органично объединяет декларативные и процедурные знания, которые активируются только по мере необходимости. Фреймовой модели близко объектно-ориентированное программирование, понятие структурированного объекта. В медицине иерархическая структура – довольно частое явление, и для многих медицинских предметных областей эта модель может быть использована в качестве основной. Модель фреймов применяется как для систем, основанных на знаниях, так и для баз данных и знаний.

#### **3.3.4. Семантические сети**

Семантические сети, или логико-лингвистические модели, пригодны для представления знаний любых типов. «Семантика» обозначает общие отношения между символами и объектами, представленными этими символами. Обычно используемая для моделирования знаний семантическая сеть состоит из двух множеств:

1. Множество узлов (вершин). Это объекты предметной области, события, процессы, явления, которым соответствуют

некоторые порции информации. В медицине можно выделить 3 основных типа узлов сети:

- наблюдения,
- патофизиологические состояния,
- категории (диагноз, прогноз, тактика лечения).

Узлы в семантической сети могут быть разделены на вершины типа (собственно концепты) и вершины ассоциативных слов, т.е. представление информации может происходить в виде элемент – свойство (концепт – атрибут). В естественном языке концептам соответствуют существительные, предложения либо контекст, а свойствам – прилагательные, наречия, глаголы. Свойства обычно также состоят из пар, но уже атрибут – значение, и в большинстве современных баз знаний используются тройки объект – атрибут – значение.

2. Множество соединяющих узлы линий, которые называются ребра (или дуги, если они имеют направления), и отражают бинарные отношения между этими узлами.

Семантическая сеть – это граф с маркированными вершинами и ребрами, поэтому мощным математическим базисом этой модели является теория графов. Сеть может состоять и из множества концептуальных графов, каждый из которых можно сопоставить определенной логической формуле. Формально семантическую сеть можно представить как:  $Q = \langle X, R \rangle$ , где  $X = \{x_1, \dots, x_k\}$  – множество знаков, соответствующих элементам множества объектов предметной области;  $R = \{R_1, \dots, R_m\}$  – множество знаков, соответствующих отношениям между этими элементами.

Разработка семантических сетей начата в 60-х годах, когда они использовались для моделирования обработки естественного языка. В первой модели такого рода (модели

Куиллиана) сетевая структура использовалась для представления семантических отношений между концептами (словами, обозначающими некоторые понятия предметной области). Так, Мастерман моделировал словарь в 15000 слов на основе 100 базовых понятий с помощью семантической сети. Синтаксисом модели являются способы описания узлов и связей, а семантикой – общая структура сети. Не всякий полученный при этом граф семантически правилен, семантически корректные (т.е. имеющие смысл) графы называются каноническими.

В сетевых структурах могут использоваться те же виды связей (типы наследования), что и в модели фреймов. Составной частью сети может быть иерархия, в которой существуют отношения по крайней мере 2 типов: IS-A и PART-OF.

В модели семантической сети механизм вывода основан на трансформации вопроса пользователя в ту же модель. Вопрос может относиться как к узлу, так и к дуге базовой семантической сети. Вопрос пользователя преобразуется в фрагмент семантической сети, в нем идентифицируются узлы и дуги, соответствующие узлам и дугам основной модели. Искомое значение узла или дуги извлекается из базы знаний при полном или частичном (с заданной степенью точности) совпадении фрагмента с частью сети. Поиск неизвестного узла может происходить также через поиск пересечения дуг от указанных узлов.

Основной особенностью семантической сети является способность выражения достаточно тонких смысловых оттенков знаний. К настоящему времени разработано много видов семантических сетей, ориентированных на различные особенности предметных областей.

Выделяют однородные и неоднородные сети: в сетях первого типа множество отношений состоит из одного элемента, т.е. объекты однородной сети связаны единственным отношением. Семантические сети могут быть ориентированными, если направление дуг определено, частично ориентированными, если направление известно не у всех дуг, и неориентированными.

Вариантом однородной ориентированной семантической сети являются сценарии, в которых дуги соответствуют, например, каузальным, временным, классификационным отношениям. Если объектами сети будут лечебные мероприятия, а единственным отношением будет отношение следования, то мы получим план лечения.

Модель семантической сети широко используется в работе со знаниями. При этом хорошо разработанные методы анализа графов могут быть частично приложены и к анализу знаний. Можно сформулировать некоторые подходы к анализу знаний на основе модели семантических сетей, выделив четыре этапа работы:

Этап представления знаний включает решение нескольких задач:

- Создание остова предметной области (множества вершин без указания связей между ними) и обеспечение избыточности этого остова.
- Организация связей между вершинами.
- Указание типа, направления и количественная оценка связей (придание им весов) с учетом мнений разных экспертов.

Чаще всего связи интерпретируются как степень общности объектов либо как семантическое расстояние между объектами. Если предметная область характеризуется



транзитивностью (возможностью расчета силы связи между непосредственно не связанными объектами), то интерпретация связи влияет на способ расчета. Расстояние между двумя объектами, связанными через третий, оценивается сложением двух компонент связи, а степень общности – умножением.

Этап описания сети включает:

- Определение базового множества как минимального множества взаимно недостижимых вершин, из которого достижима установленная доля остальных вершин графа,
- Определение центра графа как вершины (подмножества вершин) с минимальной суммой расстояний до всех остальных вершин.
- Определение радиуса графа как средней длины пути от центра графа до всех вершин.

Аналитический этап включает:

- Выявление кластеров объектов и проверка критериев кластера.
- Определение центров (ядер) кластеров, оценка радиусов и мер рассеяния кластеров.
- Поиск иерархий, или ориентированных деревьев.

По окончании этого этапа предметная область может быть описана уже как структура связанных кластеров, как система иерархий и т.п.

Навигационный этап не обязателен, но особенно важен при разработке обучающих компьютерных программ. Он включает определение множества рекомендуемых путей по базовой сетевой структуре, т.е. множества последовательностей узлов, по которым рекомендуется проводить обучение. Определение оптимальных путей навигации производится как в направлении «сверху» – на основании мнений экспертов или

анализа структуры их знаний, так и «снизу» – путем анализа популярности узлов и способов их достижения разными группами пользователей в условиях полной свободы навигации.

В настоящее время практически используется ряд вариантов семантических сетей:

1. Концептные карты являются сетью основных терминов и понятий предметной области и чаще используются в процессе обучения. В теории обучения считается, что знания организованы как сеть предположений, уникальная для каждого индивида в соответствии с его опытом и знаниями. Эта сеть не стабильна, к ней могут быть добавлены и узлы, и связи, а знания вспоминаются при активации частей этой сети. Карты концептов как раз и отражают такой тип сетевой структуры.

По сути, это визуальное представление индивидуальной структуры знаний в отдельной предметной области. При этом важны и результат (концептная карта), и процесс картирования, т.е. последовательность установления связей между концептами. И карты, и картирование отражают понимание материала человеком, разные люди могут иметь разные типы карт в одних предметных областях.

В начале картирования идентифицируются концепты предметной области для включения в данную карту. Идентификация проводится как самим преподавателем, так и совместно со студентами или самостоятельно студентами. Выбранные концепты не обязательно состоят из одного понятия и, тем более, из одного слова. В качестве концептов могут использоваться и относительно крупные элементы знаний – аксиомы, правила, гипотезы. Связи между концептами устанавливаются попарно, но количество связей от одного концепта не ограничено. В концептных картах используются

разные типы связей (прототип – экземпляр, атрибутивные, часть – целое), помеченные словом или фразой.

2. Гипертекст (ГТ) также является вариантом семантической сети, это формирование информационных массивов в виде ассоциативных сетей, узлами которых выступают порции информации (тексты, рисунки). Узлы этой сети называются nodes, chunks, pages, documents, связи (links) между ними осуществляются через определенные места узлов (anchors), чаще всего это определенные слова текста или специальные кнопки. Наиболее распространенными функциями связей в гипертексте являются:

- переход к новой теме,
- переход к комментарию,
- соединение ссылки на документ с самим документом,
- запуск новой программы.

Идея гипертекста была выдвинута В.Буш в 1945 г. в виде описания устройства "мемекс". Это устройство было предназначено для хранения книг, связей, записей и получения консультаций с высокой скоростью. Отличительное свойство мемекса – способность связывать вместе два пункта. Отличительное свойство гипертекста – автоматическое поддержание связей, как внутри документа, так и между ними.

Термин гипертекст (нелинейный текст) предложил Т. Нельсон в 1965 г. и определил его как «текстовые или графические материалы, взаимосвязанные сложным образом, которые не могут быть удобно представлены в статье». Современные определения гипертекста весьма разнообразны:

- Формат непоследовательного представления идей.
- Электронное представление текста, которое благодаря возможностям компьютера имеет преимущества свободного

движения по сравнению со строго последовательной средой бумаги.

- Отрицание линейного подхода к представлению и обработке информации.
- Стилль построения систем для представления и управления информацией в сети узлов, связанных определенными типами связей.
- Подход к организации текстовой информации сложным нелинейным образом для быстрой обработки большого объема знаний, при котором данные хранятся в сети узлов и связей.

Несмотря на многообразие формулировок, ясно, что основное отличие гипертекста от обычного текста в нелинейности представления информации. Традиционные средства передачи информации преимущественно используют линейную форму: автор предполагает, что книгу будут читать с начала до конца, аудио и видео строго линейны.

Однако, линейная передача информации не означает ее линейной организации. Наше восприятие информации всегда безусловно линейно во времени. Однако мы можем выбрать, какую порцию информации получить в данный момент, т.е. важны структура информации и движение по ней, а не линейность ее получения во времени.

От последовательности чтения текста зависит его понимание и смысл для читателя, который может не совпадать со смыслом, заложенным автором. Во время чтения (получения информации) читатель постоянно сверяет то, что читает, с тем, что прочитал и понял ранее. Мы понимаем значение текста нелинейно, поскольку постоянно устанавливаем связи с ранее прочитанным, и только так понимаем смысл текста. Линейность

изложения привносит неестественный порядок и отсутствие гибкости в текст. Гипертекст дает возможность реализовать естественную нелинейность нашего мышления.

Гипертекст позволяет пользователю практически немедленно достигнуть любой из имеющихся порций информации в зависимости от уровня его интереса и опыта в данной предметной области и сути решаемых задач. Обучающиеся могут получать и организовывать информацию в соответствии со своими когнитивными потребностями. Эти потребности уникальны, как и структура предшествующего знания студента, поэтому индивидуализация получения информации приводит к лучшему эффекту обучения. Гипертекст является инструментом адаптации текста к читателю, это эффективная система индивидуализации информации.

Отдельной проблемой гипертекста является перемещение по нему (навигация) и степень ее свободы для пользователя. Высокая степень свободы навигации имеет обратную сторону:

- Плохая навигация, дезориентация в гиперпространстве по мере усложнения структуры материала. Это связано со сложностью оценки размера гипертекста, локализации и пути в нем.
- Информационная перегрузка.
- Дезориентация в целях обучения. Любая информация в гипертексте легко доступна, но она может быть далеко не самой важной, периферической. Вследствие этого могут возникнуть концептуальная дезориентация, потеря точки зрения на проблему.

При разработке гипертекста надо разделять исходную информацию на более мелкие фрагменты по сравнению с ее линейным представлением. Это связано с ограниченностью кратковременной памяти человека, меньшей скоростью чтения с экрана, по сравнению с листом бумаги. Надо стремиться к обоснованности взаимосвязей между блоками информации, логичности имен документов, простоте навигации, не требующей напряжения пользователя.

### **3.3.5. Взаимосвязи моделей знаний**

В принципе, одни и те же знания могут быть представлены в разных моделях – и это показатель их взаимосвязи. Однако есть и более определенные связи между моделями представления знаний.

Продукционная модель и логика предикатов относятся к одной группе логических моделей. Но если в логике предикатов знания рассматриваются как единая модель предметной области, то в продукционной модели они более фрагментарны, так как элементы знаний соответствуют правилам. Для логики предикатов характерна глубокая теоретическая основа, при этом наблюдаются излишняя формализация знаний, трудность их прочтения и непроизводительность обработки. Теоретический фундамент у продукционной модели слабый, но от этого она гибче, чем логическая. Например, введение коэффициентов уверенности в логике предикатов требовало бы существенной теоретической проработки, в продукционной же модели они введены и полезны при решении практических задач и без мощного теоретического обоснования. Продукционная модель изначально поверхностна, любое правило эмпирично и представляет собой черный ящик, где известны только вход и выход. Незнание сути правила, логическая

необоснованность консеквента допустимы в продукционной модели. Эта модель широко используется в медицине, где также слаба логическая основа знаний.

Хотя сама идея и форма правил в продукционной модели заимствованы из логической, но описание знаний производится фактически в виде фрагментов семантической сети. Продукционную модель можно также представить в виде графа И / ИЛИ. Использование оператора ИЛИ эквивалентно случаю, когда есть более одного правила, приводящего к одному решению. В результате применения правил вывода происходят трансформация семантической сети, исключение из нее ненужных фрагментов. Так вместо логического вывода в продукционных моделях появляется вывод на знаниях. Определенное сходство между логической моделью и семантической сетью также просматривается, если в качестве дуги сети рассмотреть предикатный символ, связывающий два узла (две сущности предметной области).

Модель фреймов часто используют при формировании баз данных, в том числе и в продукционной модели. Напротив, продукционные правила в модели фреймов могут быть значениями слотов, демонами, связанными процедурами. Фреймы часто связаны в сеть, т.е. могут являться ее узлами, имеющими сложную внутреннюю структуру. Семантическая сеть также может органично сочетаться с другими моделями, например, продукционные правила или логические формулы могут являться или быть связаны с узлами семантической сети.

В отличие от логических моделей семантические сети и фреймы позволяют успешно структурировать информацию, наглядно представить предметную область. Однако, несмотря на большие возможности, связанные с богатством средств

отражения отношений между понятиями и объектами, семантические сети обладают некоторыми недостатками. Совершенно произвольная структура и многообразные типы вершин и связей требуют большого разнообразия процедур обработки информации, что усложняет программное обеспечение.

#### **3.4. Системы, основанные на знаниях**

В основе систем, основанных на знаниях (СОЗ), называемых также экспертными, находится обширный запас знаний о конкретной проблемной области. СОЗ – это интеллектуальная компьютерная программа, которая использует знания и процедуры логического вывода для решения проблем, достаточно трудных и требующих значительных экспертных знаний. Системы, обеспечивающие создание и использование баз знаний экспертов, демонстрируют их знания, а не свои интеллектуальные способности. Поэтому в англоязычной литературе чаще используется термин *knowledge based system* (системы, основанные на знаниях), который мы и будем употреблять в данном разделе.

СОЗ ориентированы на решение неформализованных задач, обладающих неполнотой, ошибочностью, неоднозначностью и противоречивостью знаний. Алгоритмическое решение этих задач неизвестно (хотя, может быть, и существует) или не может быть использовано в силу различных ограничений. Способ решения задачи строится самой СОЗ на базе эвристических приемов. Полученные решения ясны пользователю, так как СОЗ работают в его терминах и способны анализировать и объяснять свои действия. Основная цель работы СОЗ – согласование модели задачи, имеющейся у



человека и реализованной в базе знаний для оптимального ее функционирования.

### **3.4.1. Интеллектуальные системы**

Термин "искусственный интеллект" был предложен в 1956 г. и является не очень удачным переводом выражения *artificial intelligence*, где последнее слово означает скорее разумность, умение рассуждать, информированность. Любая интеллектуальная компьютерная система – это система обработки знаний.

Проблема использования интеллекта тесно связана с лингвистикой, психологией, логикой, т. е. с науками, изучающими познание, понимание, умозаключение. Задача интеллектуальных систем – воссоздание с помощью ЭВМ разумных рассуждений и действий – является реализацией идей Алана Тьюринга, который еще в 30-е годы утверждал, что ЭВМ должна рассуждать, а не считать. Эти идеи возродились в конце 40-х годов, а в 1956 г. появилась первая интеллектуальная система "Логик-теоретик", созданная Ньюэллом, Шоу и Саймоном. Эта система решала задачи исчисления высказываний при установлении соотношений между логикой и математикой. Ее развитием стала программа *General Problem Solver (GPS)*, о которой авторы сообщили в 1959 г. Эта программа разрабатывалась как модель переработки информации мозгом человека, она показала, что эвристические методы можно реализовать в ЭВМ, сочетая вычисления и психологию.

Основное отличие GPS от традиционных программ – нацеленность на способ решения задачи. Решение задачи складывается из описания возможных состояний и переходов между ними. Каждое состояние характеризуется набором своих

параметров, поэтому при изменении описания состояний или переходе между ними традиционная программа должна меняться. Способ же решения при этом может остаться неизменным, этот способ решения и есть знание.

В программе GPS задачи представлены в виде деревьев, объекты имеют характеристики (свойства), которые могут изменяться при применении операторов (действий). Разница объектов определяется по разнице их свойств. GPS ищет наиболее важные различия между объектами по отдельным свойствам и выбирает операторы, влияющие на нужные свойства. Затем определяет возможность применения оператора к объектам, в случае невозможности ищет другой оператор или оператор, меняющий свойства объекта так, что можно применить нужный оператор и т.д.

В медицине свойствами объекта можно считать параметры, характеризующие состояние человека, а операторами могут быть лечебные мероприятия. Цель лечения можно определить как приближение свойств объекта (характеристик больного) к свойствам некоторого эталонного объекта (идеального здорового) с помощью операторов (лечебных воздействий).

Вначале выбор операторов осуществлялся только по локальным критериям. В дальнейшем возможности GPS были расширены планированием решения задачи, т.е. вводом способов поиска управляющих стратегий. Задача сначала представлялась укрупненными блоками и решалась в области стратегического планирования, а затем уже конкретизировалась.

В начале 70-х годов произошел качественный скачок в развитии интеллектуальных систем по нескольким причинам:

- создание мощных ЭВМ, освободивших пользователя от программирования всей последовательности решения задачи,

- общий переход к безбумажной информационной технологии и ориентация на автоматизированные процессы в производстве,

- осознание необходимости использования накопленных в опыте знаний, представленных в символьной форме,

- отказ от разработки универсальных алгоритмов решения задач, ориентация на знания экспертов,

- осознание существования отдельной проблемы представления знаний, передачи знаний от эксперта программе.

К области применения СОЗ априорно относится всякая задача, требующая эвристических методов решения, для которой неизвестен алгоритм решения и существует проблема выбора между многими вариантами в условиях неопределенности. Фактически это некоторая свобода действий, необходимая для любого интеллекта, в том числе искусственного.

Со стороны пользователей интерес к СОЗ значителен, так как эти системы:

- ориентированы на решение широкого круга задач в неформализованных областях, которые ранее считались недоступными для использования средств вычислительной техники,

- не требуют знания программирования, что расширяет круг возможных пользователей,

- при решении конкретных задач достигают результатов людей-экспертов высокого класса.

СОЗ применяются при решении многочисленных задач – диагностика в широком смысле, предсказание, конструирование, интерпретация символов и сигналов, планирование, управление, контроль и др. При этом почти четверть разработанных в настоящее время СОЗ применяется в медицине и образовании, опережая бизнес и производство.

В медицине СОЗ применяются в основном для диагностики (например, MYCIN), планирования лечения (например, PLIAD), управления (например, Drug Management). СОЗ можно применять для обучения студентов без риска для больного. Это дешевый, безопасный для пациентов, но очень полезный вариант обучения, так как студенты должны изучать именно методы работы экспертов, модели предметной области, которые представлены в СОЗ.

Непосредственная цель СОЗ – оказывать помощь специалистам в их деятельности, восполняя нехватку экспертов в конкретной предметной области. Большая часть СОЗ в настоящее время использует знания в следующих целях:

- помощь в понимании и интерпретации фактов,
- идентификации источника или причины,
- составление вопросов и ответов самой системой,
- усвоение новых, исправление противоречивых, систематизация избыточных знаний.

Однако применение СОЗ дает и побочные эффекты – отсутствие излишней специализации человека, постепенное обучение "новичков". Кроме того, разработка СОЗ – один из методов исследования теории принятия решений, и в этом их теоретическая ценность.

### 3.4.2. Обучение и СОЗ

Без обучения нет ни знаний, ни систем, основанных на знаниях. Во второй половине 50-х годов сформировалась математическая психология, которая вобрала в себя теорию игр и основы теории вероятностей. С точки зрения этой науки, цель обучения состоит в выборе оптимального в данной ситуации поведения. Однако в практическом применении результатов математической психологии существуют некоторые проблемы:

- Человек не всегда придерживается рациональных взглядов, он может, а иногда хочет достичь удовлетворяющего его уровня при минимальной умственной либо физической нагрузке, т.е. снизить уровень своих притязаний вместо поиска оптимальной стратегии решения.
- Мы наблюдаем частое несоответствие теоретических предпосылок реальности. Так называемой тактики общих рассуждений в практике не существует, и оценки ситуации людьми связываются со смыслом объектов и условий.

Существуют две точки зрения на то, как представлены знания человека. Первая – знания представлены в абстрактной форме и имеют высокую степень универсальности. Действительно, знание  $2+2=4$  абстрактно и универсально.

Вторая точка зрения – знания специфичны в зависимости от места их приобретения и использования. Исследования равнозначности задач и аналогий показали, что нельзя просто применять знания, полученные при решении одних задач, к структурно идентичным им другим задачам. Наши знания специализируются в зависимости от контекста, в котором они были приобретены, и от ситуации, в которой они чаще всего использовались. Знания человека не слишком универсальны и ограничены конкретным опытом.

Однако, если смысл задач идентичен, то знания могут применяться в достаточно широкой области – это свойство полуабстрактности знаний. При обучении крайне важно путем смысловой интерпретации условий задачи (т. е. понимания того, что требуется) установить связь с существующими знаниями. Человек не считает идентичными две задачи с различным смыслом, несмотря на их формальную идентичность, причем смысл одинаковых фактов и событий может оказаться сугубо индивидуальным.

Приобретение знаний у человека и у СОЗ реализуется с помощью двух функций: получение информации извне и ее систематизация. Можно предложить следующую классификацию способов обучения СОЗ, соответствующую их способностям к формализации:

1. Получение информации без логических выводов или механическое запоминание:

- ввод программ,
- ввод фактических данных.

При этом у СОЗ необязательно наличие функции организации вывода, поскольку получаемая информация используется в неизменном виде.

2. Получение информации, представленной в форме знаний, т.е. в форме, которая может быть использована для выводов:

- во внутреннем формате, в режиме диалога, при этом необходимо наличие у СОЗ внутреннего редактора знаний,
- во внешнем формате (на естественном языке) и их понимание. При этом СОЗ необходимо иметь функцию преобразования информации во внутренний формат.

3. Обучение на примерах. При этом способе в качестве исходной информации используется набор несистематизированных примеров, образцов ситуаций и т.п.:

- Параметрическое обучение включает предварительное определение общего вида правила, которое будет результатом вывода и последующую корректировку параметров правила в зависимости от данных.
- Обучение на основе выводов по аналогии означает приобретение новых понятий путем преобразования существующих знаний, похожих на те, которые собираются получить. Если две ситуации подобны по многим признакам, то они, скорее всего, подобны и еще по одному. Лейбниц в труде «Фрагменты логики» ввел понятие пропорции для отношения аналогии: «А так относится к В, как А' к В'», например  $A-B=A'-B'$  или  $A/B=A'/B'$ . Зная координаты трех членов пропорции в многомерном пространстве, можно определить координаты четвертого члена.
- Обучение на основе выводов по индукции означает вывод общих правил путем обобщения имеющихся данных, это самый высокий уровень обучения. Именно этот тип обучения характерен для действительно интеллектуальных систем, как естественных, так и искусственных.

### 3.4.3. Общая схема

Принципиальное отличие СОЗ от традиционных программ, следующее уже из названия – это работа со знаниями, а не только с данными. В СОЗ процесс обработки данных опирается на знания о предметной области, СОЗ сама выбирает (или генерирует) необходимую для решения задачи программу. Традиционные программы можно описать отношением: *Данные*

*+ Алгоритм = Программа.* В СОЗ появляется новая архитектура, основу которой составляют база знаний и "машина вывода": *Знания + Вывод = Система.*

Традиционные компьютерные программы характеризуются процедурно-управляемой, последовательной алгоритмической обработкой информации, представленной в численном виде, проектируются линейно и обслуживаются программистами. Для СОЗ более характерна эвристическая, параллельная и интерактивная обработка символьной информации, управляемая данными. Программирование СОЗ циклическое, обслуживаются они инженерами по знаниям:

Наиболее стандартизованы компоненты СОЗ на основе продукционной модели представления знаний. Основными компонентами СОЗ являются *база данных (рабочая память)*, множество *правил продукций (база правил=знаний)* и *механизм вывода*, включающий систему управления. В зависимости от конкретной задачи база данных может быть представлена как обычной матрицей, так и реляционной индексированной файловой структурой. Рабочая память в начале работы содержит формулировку поставленной задачи, а затем в ней появляется множество фактов, которые программа смогла установить к текущему моменту времени. Этот компонент играет роль кратковременной памяти, а факты, которые она содержит, являются утверждениями, касающимися статического описания задачи и различных способов обращения к долговременной памяти. К базе данных применяются правила продукций, вследствие чего она меняется. Одни правила не "вызывают" другие, связь между правилами осуществляется только через базу данных. Система управления выбирает, какое именно



правило следует использовать, и прекращает вычисления, когда состояние рабочей памяти удовлетворяет условию остановки.

В работе СОЗ, построенной на любой модели представления знаний, можно выделить несколько функциональных блоков или модулей. Основные компоненты СОЗ следующие:

- база знаний, основанная на одной из моделей представления знаний (правила, концепции, стратегии, метаправила и т.п.), включая редактор знаний,
- база данных, рабочая память, содержащая факты, данные, текущие гипотезы,
- «записная книжка», осуществляющая управление заданиями, отбор данных из СУБД, разрешения конфликтов между знаниями,
- механизм вывода, интерпретирующий данные в соответствие со знаниями, имеющимися в базе,
- интерфейс (диалоговый блок),
- блок приобретения и накопления знаний,
- блок объяснения.

СОЗ может работать в двух режимах: приобретения знаний и в режиме решения задачи (называемом также режимом консультации или режимом использования).

В режиме приобретения знаний общение с системой осуществляет, при посредничестве инженера по знаниям, эксперт. В этом режиме эксперт, используя компонент приобретения знаний, наполняет систему знаниями, которые позволяют СОЗ в режиме решения самостоятельно, без эксперта решать задачи из предметной области.

В режиме консультации общение с СОЗ осуществляет

конечный пользователь, которого интересует результат и (или) способ его получения. Пользователь может не быть специалистом в данной области, и в этом случае он обращается к системе за результатом, не умея получить его сам. Но он может быть и специалистом, может сам получить результат, но обращается к СОЗ с целью ускорить получение результата либо возложить на СОЗ рутинную работу. Если решение СОЗ непонятно пользователю, система должна быть готова разъяснить свои действия.

Поскольку в СОЗ оба режима почти всегда интерактивны, в этих системах существенную роль играет интерфейс. Выделяют четыре основных типа интерфейса, различающиеся по сценарию:

- неуправляемый,
- жесткий, предоставляющий свободу пользователю лишь в определенных точках диалога,
- гибкий, в котором пользователь может создать свой механизм взаимодействия с СОЗ,
- интеллектуальный, в котором диалог ведется на языке предметной области.

#### **3.4.4. Классификации, стадии существования и средства разработки СОЗ**

Общепринятая классификация СОЗ отсутствует. В качестве рабочих классификаций можно использовать следующие:

1. По решаемым задачам. В основном это:

- интерпретация данных и диагностика,
- мониторинг,
- проектирование, планирование, прогнозирование,

- обучение,
- управление,
- поддержка принятия решений.

2. По возможности изменения исходных данных за время решения задачи:

- статические (исходные данные не могут меняться),
- квазидинамические (допускает изменение данных через фиксированные интервалы времени),
- динамические (исходные данные могут меняться в режиме реального времени).

3. По возможности возникновения ситуаций, не описанных в базе знаний:

- поверхностные (решение в таких ситуациях невозможно),
- глубинные (при возникновении неизвестной базе знаний ситуации СОЗ способна, используя общие принципы, определить, как надо действовать).

4. По используемым в разработке методам:

- традиционные (разрабатываются в основном методами инженерии знаний),
- гибридные (возможно сочетание с алгоритмическими программами). Объединение технологии СОЗ с технологией традиционного программирования добавляет новые качества к программным продуктам за счет обеспечения динамичной модификации приложений пользователем, большей "прозрачности" приложения; лучшей графики; интерфейса и взаимодействия.

Обобщенной характеристикой СОЗ является понятие **поколения**:

Первое поколение	Второе поколение
Ориентированы на одну область и однородные задачи	Включает несколько баз знаний и данных, решает разнородные задачи
Изолированы	Интегрированы с другими системами
Необходима предварительная формализация знаний на специальном языке	Общение на естественном языке
Статичные системы	Могут обрабатывать динамическую информацию в режиме реального времени
Поверхностные: моделируют эвристику эксперта, неспособны к самоанализу и самообучению	Глубинные, моделируют процесс мышления, способны к обучению и генерации неочевидных гипотез

По затратам на проектирование СОЗ можно условно разделить на простые (время разработки до одного года, продукционный эквивалент базы знаний – до 1000 правил) и сложные. Для разработки СОЗ используются аппаратные и программные инструментальные средства. Выбор аппаратных средств в России диктуется имеющейся вычислительной техникой, а программных – определяется назначением, степенью сложности СОЗ и подготовкой разработчиков. Программными инструментальными средствами может служить широкий спектр языков.

Программирование СОЗ на языках общего назначения достаточно трудоемко, зато универсально, и программы на этом

языке могут затем использоваться в любых типах ЭВМ. Однако существуют и специальные языки инженерии знаний, ориентированные на поддержку определенных формализмов. На входе в идеале язык должен быть близок к языку предметной области по лексике, синтаксису, семантике. Языки инженерии знаний опираются на определенные модели их представления. В принципе, чем меньше ограничений содержит модель знаний, тем хуже разработаны языки. Для семантических сетей практически нет широко используемых языков.

В начале 70-х годов появился Пролог. Этот язык просто и унифицировано представляет тезисы естественного языка в виде высказываний логики предикатов первого порядка. С его помощью можно описывать знания различных типов (определенные внутри предметной области, описывающие структуру предметной области и метазнания). Пролог имеет мощный механизм обратных выводов, обеспечивая дедукцию, индукцию, импликацию, аналогию и другие выводы. Эффективен этот язык, как и логическая модель, в тех предметных областях, где число объектов и отношений невелико.

Примером языка инженерии знаний, основанного на продукционной модели, может служить OPS-5. На модели фреймов основаны FRL (Frame Representation Language), KRL (Knowledge Representation Language), RLL (Representation Language Language), на сочетании фреймов с продукционными правилами – ART (Automated Reasoning Tool). Общая тенденция развития языков представления знаний – стирание грани между декларативными и процедурными знаниями, активная роль данных.

После создания удачных СОЗ, типа MYCIN (1976), возникла концепция «пустых» систем с очищенной базой знаний. Каждая такая система характеризовалась фиксированным способом представления знаний, организации вывода и функционирования компонентов. Поначалу создание проблемно-ориентированной СОЗ планировалось свести лишь к заполнению базы знаний. Однако модель базы знаний, система вывода, интерфейс, система объяснений жестко ограничивали разработчика, которому приходилось «втискивать» знания в рамки пустой СОЗ.

Вследствие этого стала развиваться концепция специального программного окружения разработки СОЗ – оболочек (shells). Это комплексы программ, содержащие все компоненты СОЗ и ориентированные на работу с пользователем, т.е. не предполагающие знания им программирования. Наиболее развитые оболочки содержат интерпретаторы для обработки знаний, средства контроля за корректностью решения, средства управления базой данных, средства извлечения знаний и модификации базы знаний, средства для построения интерфейса.

Используемые оболочки различаются по структурированности решаемых задач, по способу представления знаний (фреймы, продукционные правила, семантические сети, возможность их сочетанного использования), по способу хранения знаний и процедур. Отличия касаются также возможности определения достоверности знаний, стабильности знаний и данных, средств общения, организации стратегии вывода и т.п. В зарубежных оболочках часто используются иерархические базы знаний, наблюдается динамика к специализации оболочек, простоте

организации знаний, развитым средствам трассировки решения задач. В качестве примеров оболочек можно привести:

First Class – система для построения деревьев решений, состоящих из правил, может представлять их в графической форме.

ACLS – индуктивно выводит правила для СОЗ из примеров, представленных экспертом.

Microexpert – диагностическая оболочка, содержащая сеть продукционных правил, включающая подсчет коэффициентов уверенности.

NEXPERT OBJECT – может содержать до 2000 правил, мощная оболочка, строящая сети правил в графическом изображении.

PROMO – оболочка, содержащая редактор для построения баз знаний в продукционной модели и консультирующий компонент. Имеются возможности вероятностной оценки исходных данных, ввода коэффициентов уверенности правил, получения относительных вероятностей гипотез.

Основная проблема, возникающая при использовании оболочек – это возможность несоответствия управляющей стратегии методам решения, используемым экспертом.

#### **3.4.5. Методология разработки**

О компьютерных системах, основанных на знаниях, написано столько, что невольно возникает иллюзия существования теории. Однако стандартной методологии создания СОЗ нет, принципы и способы построения модифицируются в процессе разработки, по мере увеличения знаний о предметной области.

Рассмотрим примерную методологию разработки СОЗ с точки зрения инженера по знаниям. До начала разработки надо решить вопрос о необходимости СОЗ для решения данной задачи. Ответ на этот вопрос положителен, если создание СОЗ возможно, оправдано и методы инженерии знаний соответствуют поставленной задаче.

Создание СОЗ возможно, если, по крайней мере:

- существуют эксперты по данной проблеме, которые сходятся в оценке предлагаемого решения, могут вербализовать и объяснить используемые ими методы,
- задача минимально структурирована, выделены основные понятия, отношения и способы решения,
- в решении задачи не используется широкий спектр сведений об окружающем мире, так называемый «здравый смысл».

Создание СОЗ оправдано, если:

- использование человека для решения задачи невозможно, либо при этом происходит недопустимая потеря времени или информации,
- использование человека экономически нецелесообразно или приводит к значительному снижению производительности из-за множества условий и ограниченности времени,
- выполнение небольшой задачи требует большого количества специалистов, так как ни один из них не обладает нужной полнотой знаний.

Достаточно узкая и практически значимая задача соответствует методам инженерии знаний, если имеет эвристическую, а не алгоритмическую природу, и может быть решена с помощью символических рассуждений.

Коллектив по разработке СОЗ обычно состоит из:

- экспертов в предметной области,



- инженеров по знаниям (когнитологи, специалисты по разработке именно СОЗ),
- программистов,
- за рубежом в разработке участвуют менеджер и технический работник.

Готовясь к извлечению знаний о предметной области, мы должны получить информацию о нескольких важных паттернах:

- Цель извлечения знаний, назначение и функции создаваемой системы (Зачем мы это делаем).
- Специалисты, знания которых играют роль в данной предметной области при решении данной задачи (Кто это делает).
- Базовая структура предметной области, существующие в ней объекты, понятия, их атрибуты, связи между ними, т.е. структура знаний (Что мы исследуем).
- Критерии и способы принятия решений, стратегии (Как мы это делаем).
- Средства, используемые при решении задачи, оборудование, коммуникации (Где мы это делаем).
- Временные параметры и ограничения (Когда мы это делаем).
- Экономические аспекты разработки (Сколько это стоит).

Достаточно условно можно выделить пять этапов разработки СОЗ:

- идентификации,
- концептуализации,
- формализации,
- выполнения,
- тестирования и опытной эксплуатации.

Этот процесс плохо структурирован, скорее цикличен, чем линейен, и часто плохо предсказуем. Руководителем коллектива, участвующим на всех этапах разработки, обычно является инженер по знаниям.

#### Этап идентификации

Цель этапа – обеспечить начальный импульс для создания базы знаний путем неформального, вербального описания задачи. На этом этапе начинается длительный процесс абстрагирования от реального мира:

- выделение предметной области,
- ее представление в базе знаний с помощью определенной модели,
- реализация базы знаний в компьютере с помощью определенных программных средств.

Предметная область не определяется автоматически, например, после выбора в качестве цели СОЗ диагностики некоторого заболевания. Врачи (в профилактории, стационаре, на скорой помощи, в реанимации) лечат одни и те же болезни, но видят их по-разному, они делают акцент на разных гранях реального мира, и у них разные предметные области.

На этапе идентификации инженеру по знаниям необходимо ответить на ряд вопросов:

- определить задачи и подзадачи СОЗ,
- оценить границы применения СОЗ,
- начать выделение объектов предметной области и определение связей между ними,
- оценить общий вид используемых данных,
- определить природу и объем необходимых знаний,
- выяснить специфические особенности предметной области,

- оценить используемые аспекты опыта эксперта и постараться предугадать возможные источники его ошибок.

На этом этапе окончательно определяются состав участников разработки, их роли и необходимые ресурсы (источники знаний, время, финансы, вычислительная техника).

Инженеру по знаниям, овладев основами задачи до начала работы, особое внимание надо обратить на выбор эксперта. Не любой специалист может быть экспертом, и к этому участнику разработки существуют определенные требования:

- доступность,
- свободное время,
- желание сотрудничества,
- способность вербализовать информацию.

#### Этап концептуализации

Не существует общего способа представления знаний для любых предметных областей. Поэтому на данном этапе предварительно выбирается модель представления знаний, в своих терминах наилучшим образом отражающая организацию объектов предметной области и связей между ними.

На этапе концептуализации можно предложить некоторый алгоритм структурирования знаний:

- определение исходных и выходных данных,
- составление словаря терминов, обеспечение его достаточности, составление набора ключевых слов,
- выявление объектов и понятий предметной области, значимых для принятия решений,
- выявление связей между понятиями,
- выявление метапонятий и детализация понятий, выстраивание их иерархии,

- выявление ограничений, накладываемых на процесс решения,
- определение общей стратегии принятия решений.

При проектировании модели представления знаний следует стремиться к однородности представления знаний и простоте понимания. Однородность представления приводит к упрощению механизма управления логическим выводом и модификации базы знаний. Простота понимания предполагает доступность понимания представления знаний и экспертам, и пользователем системы. В противном случае приобретение знаний и их оценка будут затруднены.

В медицине и биологии предметные области часто имеют иерархическую структуру. Человек в мышлении не задается вопросом о различении типов иерархий, а при построении базы знаний это необходимо. В предметных областях можно выделить иерархии трех видов, каждая из которых соответствует определенной точке зрения:

- структурную (которая может объективно существовать либо быть отраженной в модели, классификации предметной области),
- функциональную,
- причинно-следственную.

Структурная иерархия обычно ближе к поверхностным знаниям, остальные – к глубинным.

На этом этапе рекомендуется составить детальный протокол действий и рассуждений эксперта при решении хотя бы одной конкретной задачи и не делать окончательного выбора способа представления знаний.

### Этап формализации

Цель этапа – создание базы знаний, результата абстрагирования предметной области. На данном этапе приобретается основная часть знаний, хотя этот процесс начинается еще на этапе идентификации. Процесс формализации цикличен (получение знаний, их анализ, выявление несогласованности, неполноты, модификация и расширение знаний и т.д.) и структурирован хуже других этапов. На этапе формализации уже окончательно выбираются модель представления знаний и инструментальные средства разработки СОЗ.

На этом этапе инженеру по знаниям необходимо решить следующие вопросы:

- подробные характеристики используемых данных,
- установление отношений между данными, порядок появления их во времени,
- выявление связей между понятиями, их количественная оценка, типизация, направление,
- конкретные способы приобретения знаний,
- проверка знаний на полноту, непротиворечивость, надежность, устойчивость, однозначность,
- окончательное определение структуры пространства поиска (выявление и формализация объектов и понятий предметной области, их внутренней структуры, характеристик и значений).

### Этап выполнения

Цель этапа – создание одного или нескольких прототипов, а затем конечного программного продукта для промышленного использования. При разработке СОЗ обычно

используется концепция «быстрого прототипа». При этом разные прототипы СОЗ создаются для разных целей и должны обеспечивать решение разных задач.

СОЗ могут существовать в следующих стадиях:

1. Демонстрационный прототип должен решать только небольшую часть задач СОЗ, демонстрируя возможности решения задач данной предметной области с помощью методов инженерии знаний. Может включать несколько десятков правил, фреймов, примеров. Разработку первой версии прототипа СОЗ надо начинать, когда хорошо понят первый пример ее работы. Этот прототип должен обеспечить проверку адекватности идей, методов и способов представления знаний поставленным задачам.

Процесс приобретения знаний не нужно откладывать до завершения программирования, чтобы не обнаружить в дальнейшем необходимости существенного изменения программ. Желательно использование косвенных (на классы понятий, а не на конкретные понятия) ссылок.

Вопросы, требующие значительных трудозатрат и трудно реализуемые методами инженерии знаний, на этом этапе обычно оставляют в стороне. При создании первого прототипа СОЗ не заботятся об экономии памяти и скорости работы. Особое внимание обращают на протоколирование любых изменений и вообще документации.

2. Исследовательский прототип должен решать все основные задачи СОЗ, но может быть неустойчив в работе и не полностью проверен.

3. Действующий прототип решает все задачи СОЗ, но при этом может быть слишком велик по объему или решение может занимать слишком много времени.

4. Промышленная стадия СОЗ полностью готова к работе.

5. Коммерческая стадия СОЗ учитывает все требования конечного пользователя к работе системы и, особенно, к интерфейсу.

При последующих возвращениях к этапу выполнения необходимо проанализировать работу СОЗ при значительном расширении базы знаний, провести анализ мнения пользователей о ее недостатках, разработать удобную систему ввода и вывода.

#### Этап тестирования и опытной эксплуатации

Этот этап начинается после того, как СОЗ готова отработать от начала до конца 2-3 примера. Основными источниками неудач при тестировании являются:

- неправильный выбор управляющей стратегии, правил вывода (недоучет взаимозависимости правил, их противоречивость, неполнота),
- неправильный выбор примеров (не охватывают всех типов задач, не показательны, в худшем случае лежат вне предметной области),
- недостатки интерфейса.

Критерии оценки СОЗ должны быть сформулированы как можно раньше и быть различными на разных этапах разработки. Этими критериями являются, прежде всего:

- гарантия точности ответов в режиме консультации,
- соответствие базы знаний и экспертных знаний (статическая оценка),
- эквивалентность рассуждений эксперта и СОЗ (динамическая оценка),
- интеллектуальность интерфейса,

- время работы,
- соотношение стоимости и эффективности СОЗ.

Первый прототип СОЗ оценивается с точки зрения эксперта, промышленный уровень разработки – с точки зрения коллектива разработчиков, прежде всего инженера по знаниям, а после опытной эксплуатации основным является мнение конечного пользователя.

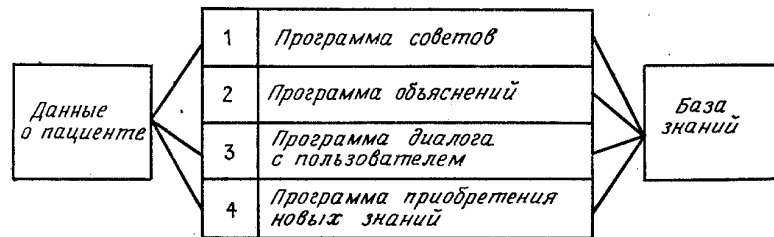
Пригодность СОЗ для конечного пользователя целесообразно проверять на месте его работы. По результатам этого этапа может потребоваться изменение программ и данных, устройств ввода и вывода, перенос СОЗ на другой тип ЭВМ. Модификация СОЗ возможна на любом этапе – от минимальной степени до пересмотра способа представления знаний и переформулировки понятий.

#### **3.4.6. Примеры СОЗ, используемых в медицинской практике**

MYCIN представляет собой типичную производственную экспертную систему, которая оперирует с большим количеством знаний, заданных в описательной форме. Система создана Шортлиффом с коллегами в 1975-1976 гг.; это первая большая и самая знаменитая медицинская СОЗ, направленная на диагностику и лечение бактериальных заражений крови. Система разработана в Стэнфордском Университете с целью оказания помощи врачам при постановке диагноза и лечении. В программе не используется детальная модель физиологических процессов. Достоинством MYCIN является то, что используемые процедуры вывода имеют достаточно общий характер, а программа получает результаты высокого качества и эффективно применяется в практике.



Система MYCIN состоит из базы знаний и четырех главных программ, которые взаимодействуют между собой по схеме:



База знаний состоит примерно из 400 продукционных правил. Факты, относящиеся к внешнему миру, представляются в виде триплетов, оцененных фактором определенности, который может принимать значения от  $-1$  до  $1$ . Фактор определенности – это разность между мерами доверия и недоверия, каждая из которых лежит в интервале от  $0$  до  $1$ . Мера доверия гипотезе при наличии двух событий определяется как  $МД = МД_1 + МД_2 * (1 - МД_1)$ , последовательность событий при этом не имеет значения. Аналогично определяется мера недоверия, и система движется к состоянию определенности. Этот подход не различает противоречивых свидетельств (обе меры велики), от состояния неопределенности (обе меры малы).

Правила представляются на естественном языке. Одна группа правил предназначена для диагностики, другая – для формирования плана лечения. С каждым правилом связан коэффициент надежности (**КН**), принимающий значения от  $0$  до  $1$ , который отражает большую или меньшую достоверность заключения эксперта.

Формирование заключений происходит путем обратного вывода, от гипотез о типе микроорганизмов (возможных причин

инфекции) к вызываемым ими симптомам. После выдвижения гипотезы система рассматривает все правила, в правых частях которых содержится факт – проверяемая гипотеза. Левая часть каждого правила оценивается, и коэффициент надежности результата определяется как минимум из значений коэффициентов надежности посылок. В системе есть возможность установить граничное значение КН, если с правилом связан коэффициент меньше граничного, то оно не рассматривается.

Система MYCIN использует для каждой цели абсолютно все релевантные правила с учетом коэффициентов надежности, так как в этой предметной области желательно взвешивать варианты и составлять суждения о каждом возможном случае. Лишь в том случае, когда вывод полностью определен ( $КН = 1$ ), возможно прекращение работы системы и принятие решения.

MYCIN в течение всей работы сохраняет исходные условия, в частности, всю историю болезни. На этом основывается знание того, какой вопрос нужно задать эксперту на следующей фазе, если в полученной прежде информации обнаруживается ошибка. Эти свойства MYCIN обусловлены тем, что при ее разработке существенное внимание было уделено объяснению системой своих действий, чтобы сделать их понятными врачу и более убедительными.

Система MYCIN послужила основой для разработки теми же авторами ряда других программ.

**TEIRESIAS** (Shortliffe, 1976) – практически это интерфейс для MYCIN, эксперта и пользователя, специализированная система по переносу знаний от эксперта в базу в режиме диалога, без инженера по знаниям. Используются метаправила для управления выводом и разрешения

конфликтов. В программу добавлены объяснительные возможности для комментирования целей, сработавших правил, задаваемых вопросов. Программа возникла как следствие трудности представления знаний продукционными правилами.

**GUIDON** (Shortliffe, 1976) – представляет интерфейс для MYCIN, созданный с целью обучения.

В системе **EMYCIN** (Ван Мелл, 1981) есть управление рабочей памятью, редакция базы знаний. Эта СОЗ близка к понятию оболочки, так как механизм вывода выделен в отдельную программу и может использоваться в других предметных областях.

**CASNET** (Causal ASsociational NETwork) разработана Weiss и Kulikowski в 1977 г. Предназначена для диагностики глаукомы, содержит 3 уровня знаний, каждый из которых представлен семантической сетью: наблюдение, патофизиологическое состояние, диагноз. Связи между уровнями осуществляются через продукционные правила с коэффициентами уверенности. В данной системе декларативные знания (сетевое представление) отделены от механизма вывода (продукционные правила).

В середине 80-х годов группой отечественных разработчиков создана диагностическая система **МЕДИКС**, которая использовалась в качестве консультирующей для корабельных врачей. Базы знаний для этой системы были разработаны в нескольких предметных областях, в том числе по диагностике острого живота, боли в груди, видов комы. От эксперта разработчики получали информацию в явном виде, как последовательную классификацию предъявляемого набора состояний (совокупностей симптомов). Кроме массива симптомов, в системе имеются массив диагнозов (классов) и

матрица характерности признаков для классов (фактически это функция принадлежности нечетких множеств).

**MKOS (Medical Knowledge Organizing System)** разработана Muscarello с соавт. в 1986 г. Эта система создана для планирования лечения определенных видов рака препаратами ряда адриамицинов после установления диагноза. Основана на иерархической модульной организации медицинских знаний, связанной с семью уровнями биологической организации человека (системы органов, органы, ткани и т.д.). На каждом уровне используется триплетная схема: структура – функция – причина.

Процедурные знания в системе отделены от декларативных и представлены продукционными правилами с коэффициентами уверенности. Это обеспечивает модульность СОЗ и количественную оценку уверенности в выводе.

В системе есть три базы декларативных знаний: болезней, лекарств, пациента, а также три модуля: приобретения знаний, редактирования и консультации. Все базы знаний основаны на фреймах, которые идентичны по структуре и подразделяются на 3 домена:

- общей информации (ФИО пациента, производитель лекарства, т.е. информация, не связанная напрямую с биологической структурой или функцией),
- структурной (классификации, используемые в анатомии, биохимии и т.д.)
- функциональной информации (изменение различных параметров во времени, наличие пиков, латентного периода), связанной со структурными элементами.

Такое представление обеспечивает единообразное хранение и легкое изменение знаний. С каждым слотом может

быть ассоциировано много значений, каждое из которых может быть списком. Используется свойство наследования для атрибутов, общих для всей группы слотов.

Использование этой системы врачами значительно облегчается благодаря связанному с ней гипертексту, в узлах которого находится справочная информация. В гипертексте использованы три типа узлов сети:

- генерального уровня – не связаны с текстом, только показывают, на каком иерархическом уровне находится пользователь,
- контрольные – участвующие в управлении выводом,
- информационные.

Таким образом, в данной СОЗ используются три основные модели представления знаний. Декларативные знания содержатся в виде фреймов, продукционная модель использована для процедурных знаний, сетевая – для справочной информации.

#### **3.4.7. Проблемы разработки и использования**

Выгоды от использования СОЗ значительны и разнообразны. К ним относятся улучшение качества решений, увеличение продуктивности работы. Установление стандартов, согласованность между лицами, принимающими решение, упрощение обучения и тренировки также важны для медицинской практики.

Однако в медицине СОЗ используются относительно мало, и тому есть ряд веских причин. Часто при создании СОЗ знания, необходимые для решения задачи, представляются отдельно от знаний по организации биологических структур. Некоторые системы не отслеживают цепочку выводов и

используют модели, специфичные для данного диагностического решения, не связанные с общей структурой предметной области. Врач вряд ли использует СОЗ, которая не объясняет своих действий. СОЗ должна не только давать рекомендации, но и иметь большой информационный блок, объяснять свои решения, предоставлять ссылки на источники информации. Достаточно глубокое представление знаний, связанный гипертекст позволяют использовать систему для инструкций и объяснений. Медицинская запись о пациенте – корпоративный продукт, в котором участвует много специалистов, лабораторий и т.п., и в нем важна преемственность.

Можно перечислить некоторые характеристики, желательные для медицинских СОЗ:

- представление, основанное на глубоких знаниях,
- структурная и функциональная связь между уровнями знаний,
- отслеживание причинных зависимостей,
- языковая среда, дружественная пользователям,
- возможность быстрого изменения,
- использование техник экспертов,
- объяснение всех решений и ссылки на источники знаний.

Проблемы создания СОЗ можно разделить на глобальные и локальные. К глобальным проблемам относится недостаток ресурсов (программных, аппаратных, человеческих), длительность разработки и ограничения существующих СОЗ. Под ограничениями понимаются недостаточные возможности генерации заключений, основанных на «здоровом смысле», низкая эффективность определения противоречивости знаний и устранения их несогласованности.

Локальные проблемы связаны с этапами разработки СОЗ:

- на этапе идентификации – с неверным определением необходимых ресурсов и неудачным выбором эксперта,
- на этапе концептуализации – с переплетением знаний о предмете экспертизы с проблемно-независимыми знаниями и с большим количеством экспертов,
- на этапе формализации – с неверным выбором инструментальных средств,
- на этапе тестирования – с поздним его началом, недружественным интерфейсом, плохим подбором тестовых задач,
- на всех этапах – с потерей экспертом интереса к разработке, с его непониманием работы СОЗ.

Перспективным направлением в разработке СОЗ является использование специализированных оболочек, систем создания и поддержания баз знаний, совмещение методов инженерии знаний с традиционными языками программирования. Наблюдается тенденция перехода от ядерных проблем искусственного интеллекта, традиционных систем принятия решений к гибриду информационной системы, базы данных и знаний с графическим развитым интерфейсом.

### **Заключение**

В медицине парадоксальным образом сочетаются два противоположных свойства. С одной стороны, чрезвычайная важность врачебных решений и высокая ответственность за них врача, с другой – нечеткие критерии правильности и эффективности этих решений.

Яркий пример неопределенности критериев в медицине можно привести из практики американских врачей. В Нью-Йорке в начале 30-х годов был проведен осмотр 1000 школьников, у 611 из которых к моменту осмотра были удалены миндалины и/или аденоиды. Из 389 "интактных" школьников 174 были признаны нуждающимися в удалении миндалин. 215 "здоровых" детей осмотрела группа других врачей, и 99 из них признали нуждающимися в удалении миндалин. Третья группа врачей осмотрела 116 оставшихся "здоровыми" и дала такие же рекомендации 51 из них, т.е. здоровыми осталось 65 школьников из 1000. Если бы осмотр был продолжен, количество не нуждающихся в операции детей стремилось бы к нулю.

Расхождение врачебных оценок было изучено на примере результатов флюорографических обследований. Врачи пропускали в среднем 20-25% поражений легких и указывали на заболевание у 2-3% здоровых лиц. При этом заключения врачей были нестабильны: через несколько месяцев каждый пятый случай был оценен тем же врачом противоположным образом, т.е. внутрииндивидуальная вариабельность оценок экспертов довольно высока. При пальпации шейных лимфатических узлов опухоли были пропущены врачами в 28%, и так же часто ошибочно обнаружены. Только в половине случаев совпадали заключения врачей о размере опухоли молочной железы и наличии метастазов в подмышечных лимфатических узлах. Степень совпадения оценок пропорциональна опыту эксперта, но даже очень опытный врач склонен не соглашаться с другим врачом сходной квалификации в трети случаев. Даже стандартизация описания больного дает мало. При предъявлении вымышленных стандартных историй болезни



через 2 года тем же врачам более половины хирургов изменили одно суждение из трех.

Наиболее велики расхождения в оценке врачами данных анамнеза, физикальных методов и жалоб, которые трудно стандартизовать. Сложно согласовать мнения специалистов в слабо формализованных областях медицины, например в психиатрии. На оценку состояния больного психиатром влияют его пол, возраст, отношение к религии, принадлежность к определенной культуре, заинтересованность в судьбе больного.

Вследствие неполной определенности критериев врачебных заключений, их слабой согласованности и воспроизводимости, диагностической ошибкой можно считать неверное решение, принятое при простой классификации и подтвержденное большинством специалистов или самим специалистом при повторном анализе. Если же классификация сложна, есть расхождения мнений специалистов, то корректнее считать это вариабельностью оценки.

Медицинские знания характеризуются неопределенностью, неполнотой, относительной субъективностью аргументации и правил. Попытки уточнения знаний, придание утверждениям количественного, вероятностного характера отражают в основном уверенность автора утверждения, а не статистические закономерности, наблюдаемые в предметной области. Неопределенность в медицине – не следствие случайности, как в статистике. Это следствие особенностей поведения человека, его ошибок, недостаточной информации об объекте исследования и сути патологических процессов.

В принятии решений человек обычно совмещает два подхода. Эвристические правила применяются в основном в

условиях неопределенности, а после выбора стратегического направления действий используются алгоритмы поведения. Эвристические подходы нельзя противопоставлять алгоритмическим – они дополняют друг друга. По мере развития медицинской науки эвристические правила могут алгоритмизироваться, переходить в разряд строгих методов. История медицины повторяет общую схему развития науки: от накопления и систематизации данных к выработке “чутья”, интуиции, затем через формализацию процессов к разработке алгоритмов. Однако значение эвристических подходов при этом не уменьшается из-за расширения областей знаний человека и увеличения круга решаемых проблем. Судя по всему, полная алгоритмизация принятия решений в медицине никогда не будет достигнута. Всегда останется часть проблем, допускающих свободу выбора, а, следовательно, и непосредственное взаимодействие наблюдаемых фактов с интеллектом врача или базой знаний компьютерной системы. Очевидно, прав был Дж. фон Нейман, утверждая: “Язык мозга не есть язык математики”.

**Рекомендуемая литература**

1. Власов В.В. Эффективность диагностических исследований. – М.: Медицина, 1988.
2. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб: Питер, 2000.
3. Генкин А.А. Новая информационная технология анализа медицинских данных. – СПб: Политехника, 1999.
4. Гублер Е.В. Вычислительные методы анализа и распознавания патологических процессов. – Л.: Медицина, 1978.
5. Двойрин В.В., Клименков А.А. Методика контролируемых клинических испытаний. – М.: Медицина, 1985.
6. Ластед Л. Введение в проблему принятия решений в медицине. – М.: Мир, 1971.
7. Лещинский Б.С. Концептуальное представление экономической информации. – Томск: Изд-во ТГУ, 2000.
8. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта. – М.: Мир, 1991.
9. Обработка знаний / Ред. С. Осуга. – М.: Мир, 1989.
10. Представление и использование знаний / Ред. Х. Уэно, М. Исидзука. – М.: Мир, 1989.
11. Приобретение знаний / Ред. С. Осуги, Ю. Саэки. – М.: Мир, 1990.
12. Райфа Г. Анализ решений. – М.: Наука, 1977.
13. Таунсенд К., Фохт Д. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ. – М.,

1990.

14. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. – М.: Мир, 1989.
15. Флетчер Р., Флетчер С., Вагнер Э. Клиническая эпидемиология.– М.: Медиа Сфера, 1998.
16. Червинская К.Р., Щелкова О.Ю. Медицинская психодиагностика и инженерия знаний. – СПб.: Ювента, 2002.

## Оглавление

Введение	3
1. ПРОБЛЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	4
1.1. Компоненты решений	5
1.2. Типы проблем в медицине	7
2. АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ПОДХОД	12
2.1. Характеристики данных и организация исследований в медицине	13
2.2. Характеристики методов диагностики	38
2.3. Принятие решений	71
2.4. Эффективность алгоритмического подхода	87
3. ЭВРИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД	97
3.1. Свойства и особенности знаний	99
3.2. Приобретение знаний	107
3.3. Модели представления знаний	131
3.4. Системы, основанные на знаниях	168
Заключение	199