

Многокритериальный выбор с уменьшением размерности пространства признаков: многоэтапная технология ПАКС¹

Аннотация. Рассматривается новая многоэтапная технология многокритериального выбора, которая включает снижение размерности пространства, образованного дискретными качественными признаками, построение иерархической системы составных критериев и интегрального показателя качества решения, классификацию и упорядочение многопризнаковых вариантов, используя разные комбинации нескольких методов вербального анализа решений. Технология базируется на предпочтениях лица, принимающего решение (ЛПР), существенно сокращает время и трудоемкость решения задач многокритериального выбора, позволяет ЛПР проводить содержательный анализ полученных результатов. Разработанная технология была применена на практике для оценки результативности научных проектов, которые оценивались несколькими экспертами по многим качественным критериям.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, вербальный анализ решений, снижение размерности признакового пространства, иерархическое агрегирование признаков, составной критерий, интегральный показатель, оценка результативности научных проектов.

Введение

В задачах принятия решений рассматриваемые варианты (объекты, системы) обычно характеризуются многими разнообразными признаками: техническими, эксплуатационными, экономическими, политическими и иными. В такой ситуации выбор лучшего варианта, упорядочение или классификация альтернатив на основе предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР), становится весьма нетривиальной задачей. Методы решения задач многокритериального выбора различаются способами получения, обработки и представления информации о свойствах вариантов и предпочтениях ЛПР [1-5, 7, 8, 11, 12, 16, 19-24, 26-29]. Дополнительные трудности появляются в случае слабо структурируемых проблем, сочетающих количественные и качественные зависимости, для

которых построение объективных моделей либо невозможно в принципе, либо сопряжено с существенными сложностями. Примерами таких задач служат конкурсный отбор научных проектов, оцененных несколькими экспертами по многим качественным критериям [6], диагностика заболеваний [20], оценка кредитоспособности владельцев кредитных карт [10, 25], выбор вычислительного кластера [17].

В реальных ситуациях выбора число признаков, описывающих свойства объектов, может быть достаточно велико. Поэтому непосредственное сравнение, упорядочение или классификация многопризнаковых объектов является весьма трудоемкой процедурой, которая требует значительных временных затрат ЛПР и разработки специальных методов его опроса. Когда сравниваемых объектов мало (3-5), а их признаки многочисленны (десятки и сотни), такие объ-

¹ Работа поддержана программами фундаментальных исследований президиума РАН «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы» и ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация», РФФИ (проекты 11-07-00398, 12-07-00034, 12-07-90800), РГНФ (проекты 11-02-00131, 12-02-00525, 12-33-10608).

екты, как правило, оказываются формально несравнимыми по значениям своих атрибутов. Кроме того, при решении задач большой размерности нередко применяются различные упрощенные стратегии, учитывающие только часть имеющейся информации, что отрицательно сказывается на итогах – упорядочении объектов, выработке решающих правил, построении границ классов решений – и затрудняет дальнейший анализ полученных результатов.

Эти обстоятельства диктуют необходимость создания способов обработки информации, обеспечивающих решение задач многокритериального выбора в пространствах большой размерности. Один из подходов к преодолению указанных трудностей при сравнении многокритериальных объектов состоит в сокращении размерности признакового пространства [1, 2] и использовании психологически корректных операций получения информации от ЛПР и экспертов [3, 5]. Специальные исследования показали, что человек допускает меньше ошибок, оперируя с вербальными данными, нежели с числовыми. Человеку легче сравнивать объекты по небольшому числу показателей, результаты таких сравнений более надежны, их проще анализировать.

В работе представлена новая многоэтапная интерактивная технология ПАКС (Последовательное Агрегирование Классифицируемых Ситуаций), которая предназначена для сравнения, упорядочения и классификации многопризнаковых объектов по их свойствам. Технология сочетает методы вербального анализа решений [5, 11] и процедуры снижения размерности признакового пространства [13, 18], с помощью которых большое число исходных характеристик объектов (числовых, символьных или вербальных) последовательно агрегируется в небольшое число критериев, имеющих небольшие шкалы градаций оценок, отражающих предпочтения ЛПР. Шкалы критериев конструируются с помощью разных комбинаций нескольких методов вербального анализа решений. Сформированные критерии используются при решении рассматриваемой задачи многокритериального выбора. Процедура агрегирования признаков имеет блочный характер, за счет чего значительно сокращаются трудоемкость и время получения итоговых результатов, появляется возможность их содержательного объяснения. Предложенная технология была

применена для оценки результативности научных проектов, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований [14].

1. Методы решения задач многокритериального выбора

Задача многокритериального выбора в самом общем виде формулируется следующим образом. Задана совокупность вариантов (альтернатив) $A_1, \dots, A_p$, оцененных по многим критериям $K_1, \dots, K_m$. Каждый критерий K_i имеет шкалу $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^{g_i}\}$, $i=1, \dots, m$, дискретные числовые или вербальные градации которой в ряде случаев упорядочены. Основываясь на предпочтениях ЛПР, требуется: выделить один или несколько лучших вариантов; упорядочить все варианты; распределить исходную совокупность вариантов по классам (категориям) $D_1, \dots, D_q$. Укажем основные методологические подходы к решению этих задач, которые различаются по способам и типу получаемой от ЛПР информации.

Выделение лучших вариантов проводится с помощью разнообразных методов оптимального выбора, основанных на поиске экстремума одной или многих функций, характеризующих эффективность или качество решения, называемых функциями ценности или полезности [11]. В методах многокритериальной оптимизации и многомерной полезности MAUT [4] обобщенный критерий, используемый для сравнения вариантов и определения лучшего варианта, обычно задается сверткой многих частных числовых критериев в виде взвешенной суммы. Вместе с тем построение обобщенной функции полезности при большом числе частных критериев сопряжено с заметными трудозатратами ЛПР. Назначение весов исходных показателей также является достаточно серьезной и неоднозначно решаемой проблемой.

Для упорядочения объектов в целом или по многим критериям часто используются методы, основанные на парных сравнениях объектов. Полное упорядочение объектов получается, если сравнимы все пары вариантов и транзитивны предпочтения единственного ЛПР. Если некоторые из вариантов окажутся несравнимыми, то упорядочение будет частичным. Если же все варианты несравнимы, то упорядочить их не удастся. В методах аналитической иерархии [11, 19] варианты ранжируются по показателю

их приоритетности, который последовательно вычисляется путем попарного сравнения вариантов, критериев их оценки и участников по отношению к глобальной цели решаемой задачи. Однако методы аналитической иерархии весьма чувствительны к контексту выбора: добавление или исключение вариантов может существенно изменить итоговое упорядочение.

Прямая сортировка объектов по заданным классам – один из наиболее популярных методов классификации вследствие простоты применения. Каждый объект, оцененный по единственному числовому критерию, немедленно попадает в один из указанных классов. Весьма распространены методы, основанные на взвешенной свертке критериев, например, методы многомерной полезности [4, 11]. В интерактивной процедуре классификации [24] предпочтения единственного ЛПР описываются линейной функцией полезности, являющейся взвешенной суммой многих скалярных критериев. Порядковая сортировка многопризнаковых объектов в методе TOMASO [26] проводится по вычисляемым значениям интеграла Шоке, который агрегирует семейства дискриминантных функций.

При оценке объектов по числовым критериям и назначении весов критериев могут возникнуть различные проблемы. Так, доказано, что использование взвешенной суммы критериальных оценок корректно только в том случае, когда критерии попарно не зависимы по предпочтению [4]. Вместе с тем назначение ЛПР весов критериев является субъективной и не имеющей строгих обоснований процедурой, а построение функции полезности при большом числе критериев сопряжено с большими трудозатратами ЛПР. Применение методов, использующих взвешенную свертку критериев, для решения задач многокритериального выбора не позволяет дать объяснения полученным результатам, поскольку невозможно восстановить исходные данные по агрегированным показателям. Показано также, что методы многомерной полезности чувствительны к ошибкам измерений [7, 16].

В семействе методов ELECTRE объекты оцениваются по многим критериям, имеющим балльные шкалы и разные веса, которые задаются ЛПР [27-29]. Функция полезности не строится, а объекты сравниваются попарно по так называемому отношению ограниченной предпочтительности (outranking relation), которое определяется специальными индексами со-

гласия (конкорданса) и несогласия (дискорданса). Значения этих индексов вычисляются в процессе решения задачи и используются для упорядочения объектов и построения границ классов.

Классификация многокритериальных альтернатив с применением огрубленных множеств изложена в работах [21, 22]. Предпочтения ЛПР выражаются с помощью наборов решающих правил, которые с разной степенью определенности относят альтернативы в заданные классы. Метод оперирует с достаточно большим числом решающих правил классификации, трудным для непосредственного анализа ЛПР, и требует предварительной настройки (обучения) на специально выделенных массивах данных.

В методологии вербального анализа решений, который ориентирован на слабо структурируемые проблемы выбора, свойства рассматриваемых вариантов и классы решений описываются с помощью качественных критериев, имеющих словесные формулировки градаций на шкалах оценок [5, 11, 20]. Численные коэффициенты важности критериев и ценности вариантов не рассчитываются и не применяются, а вербальные оценки признаков не преобразуются в какие-либо числовые показатели. Тем самым, используя только качественные измерения, на множестве кортежей многокритериальных оценок задаются отношения превосходства и эквивалентности вариантов решения, с помощью которых осуществляется их порядковая классификация, частичное упорядочение или выделение лучшего варианта.

Для упорядочения вариантов в семействе методов ЗАПРОС используется специальная так называемая единая порядковая шкала, которая конструируется из комбинаций оценок на шкалах критериев. Методы ОРКЛАСС, СТЕПКЛАСС, ЦИКЛ позволяют строить полную и непротиворечивую классификацию многокритериальных альтернатив. В методах вербального анализа решений проводится проверка согласованности суждений ЛПР и устранение выявленных противоречий. ЛПР активно участвует в постановке, анализе и решении стоящей проблемы, может разносторонне и достаточно подробно выражать и корректировать свои предпочтения в ходе решения задачи, а также получать объяснение промежуточных и итоговых результатов. В целом вербальные методы более «прозрачны», мало

чувствительны к ошибкам и менее трудоемки для человека.

В задачах группового многокритериального выбора при наличии нескольких ЛПР возникает проблема агрегирования индивидуальных предпочтений ЛПР, которые могут быть несовпадающими и противоречивыми. Чтобы построить обобщенную ранжировку, исходя из индивидуальных ранжировок по отдельным критериям, полученных от многих ЛПР, используют процедуры голосования, например, правило Борда, или медиану Кемени [11]. При наличии многих критериев и/или нескольких ЛПР результирующее упорядочение объектов, например, в методе TOPSIS [11, 23] строится на основе парных сравнений векторов оценок, представляющих объекты. При увеличении числа объектов, критериев и ЛПР резко возрастает и число возможных сопоставлений. В таких случаях получение итогового результата существенно затрудняется из-за возможных неточностей и противоречий в суждениях ЛПР.

Методы группового вербального анализа решений АРАМИС (Агрегирование и Ранжирование Альтернатив относительно Многопризнаковых Идеальных Ситуаций) [11] и МАСКА (МногоАспектная Согласованная Классификация Альтернатив) [12], основанные на теории мультимножеств [9], позволяют решать задачи группового упорядочения и классификации многопризнаковых объектов, учитывая противоречивую информацию.

Независимо от способа получения информации от ЛПР известные нормативные методы принятия решений неудовлетворительно работают в большом признаковом пространстве. Из наиболее часто встречающихся проблем отметим, в частности, следующие:

- большие трудозатраты ЛПР (например, при построении функции полезности, выявлении весов критериев, попарном сравнении альтернатив);
- трудность объяснения полученных результатов (например, при свертке критериев нельзя восстановить исходные данные по агрегированным показателям);
- необоснованность процедур перевода вербальных измерений в числовые оценки;
- рост числа несравнимых вариантов (неполнота отношений) и появление циклов альтернатив (нарушение транзитивности).

Чтобы преодолеть отмеченные недостатки и упростить процедуры сравнения многопризнаковых объектов по их свойствам, необходим соответствующий инструментарий, который позволяет агрегировать большое число характеристик в небольшое число критериев, имеющих небольшие шкалы градаций оценок, отражающих предпочтения ЛПР. Изложим основные идеи нового методологического подхода к решению задач многокритериального выбора, который объединяет методы вербального анализа решений, процедуры снижения размерности признакового пространства и агрегирования критериев.

2. Многоэтапный многокритериальный выбор

Для решения задач многокритериального выбора разработана многоэтапная технология ПАКС (Последовательное Агрегирование Классифицируемых Состояний), в которой используется последовательное уменьшение размерности признакового пространства при помощи нескольких различных методов вербального анализа решений и/или их сочетаний. Процедура решения задачи многокритериального выбора с применением технологии ПАКС включает три этапа.

На первом этапе, основываясь на предпочтениях ЛПР, проводится снижение размерности признакового пространства путем построения иерархической системы составных критериев. Составным критерием будем называть интегральный показатель, который характеризует выбранное ЛПР свойство вариантов, агрегирующее исходные характеристики. Каждая градация шкалы составного критерия является комбинацией градаций оценок исходных показателей. Система критериев строится с помощью метода ИСКРА (Иерархическая Свертка Критериев и Атрибутов) [18].

На втором этапе, используя различные методы вербального анализа решений [5], последовательно формируются шкалы всех составных критериев. Построение шкалы каждого составного критерия рассматривается как задача порядковой классификации, где в качестве классифицируемых объектов выступают комбинации градаций оценок исходных показателей, а классами являются градации оценок составного

критерия. Тем самым каждая комбинация градаций оценок будет соответствовать некоторой градации оценок на шкале комплексного критерия [13]. На третьем этапе выполняется окончательное решение рассматриваемой задачи выбора в полученном пространстве составных критериев меньшей размерности с помощью того или иного метода принятия решений.

Рассмотрим особенности применения технологии ПАКС. Агрегирование признаков базируется на предпочтениях ЛПР. Первоначально при участии ЛПР формируется набор исходных характеристик рассматриваемых вариантов. В зависимости от специфики задачи эти характеристики могут быть либо заданы заранее, либо сформированы в процессе анализа проблемы с помощью аналитика-консультанта или эксперта. Для каждого исходного показателя строится шкала, которая может иметь числовые (точечные, интервальные) или вербальные градации оценок. Шкалы исходных показателей могут совпадать с обычно используемыми на практике, либо конструироваться специально.

Для задач выбора наилучшего варианта и ранжирования вариантов целесообразно рассматривать только те градации оценок исходных показателей, которые встречаются в описании имеющихся вариантов $A_1, \dots, A_p$. Таким способом можно предварительно сократить размерность исходного признакового пространства. Если изначально не задан набор реальных альтернатив, необходимо рассматривать множество всех возможных кортежей оценок в признаковом пространстве, образованном декартовым произведением градаций оценок на шкалах критериев.

Далее, основываясь на опыте и интуиции ЛПР, строится иерархическая система критериев. ЛПР по своему усмотрению определяет число, состав и содержание критериев каждого уровня иерархии. В качестве критерия можно выбрать один из исходных показателей или несколько исходных характеристик, объединенных в составной критерий. ЛПР устанавливает, какие исходные показатели будут считаться самостоятельными критериями, а какие будут отнесены к тому или иному составному критерию. Процедура агрегирования показателей носит последовательный характер, т.е. полученные группы критериев объединяются поочередно в новые группы следующего уровня иерархии и так далее вплоть до единственного

интегрального критерия самого верхнего уровня, если это необходимо.

В практических задачах многокритериального выбора иерархическая система критериев может быть известна полностью (например, организационная структура предприятия), известна частично (например, только технические характеристики устройства) и неизвестна вообще, т.е. иерархию требуется разработать «с нуля» (например, характеристики научных исследований или результатов). При построении системы критериев в первом случае основное внимание нужно уделить разработке шкал составных критериев. Особенностью разработки системы критериев во втором и в третьем случаях является возможность сформировать разные наборы составных критериев различными способами (например, последовательно объединяя критерии попарно или формируя группы критериев исходя из их некоторой смысловой общности). Это позволяет ЛПР сравнить полученные результаты для разных наборов составных критериев, сформированных с помощью различных подходов, с целью оценки качества решения исходной проблемы.

ЛПР определяет также смысловое содержание критериев и градаций шкал оценок. Критерии должны иметь такие шкалы оценок, которые, с одной стороны, будут отражать агрегированные свойства объектов, а с другой стороны, будут понятны ЛПР при окончательном упорядочении или классификации объектов. Рекомендуется строить шкалы критериев с небольшим (3-5) числом вербальных градаций. Чтобы уменьшить влияние особенностей различных методов, с помощью которых конструируются шкалы составных критериев, предлагается на разных этапах технологии ПАКС применять несколько различных методов и/или их сочетания. Использование многих разных способов построения шкал составных критериев и интегрального показателя превращает исходную задачу выбора в задачу коллективного выбора, в которой варианты представляются несколькими объектами, заданными многими нечисловыми признаками. Поэтому следует ее решать с помощью методов группового вербального анализа решений.

Так, например, групповая сортировка многопризнаковых объектов может строиться методом АРАМИС (Агрегирование и Ранжирование Альтернатив около Многопризнаковых Иде-

альных Ситуаций) [11], который позволяет ранжировать объекты, описанные многими повторяющимися количественными и/или качественными атрибутами $K_1, \dots, K_m$, без построения индивидуальных ранжировок объектов. Многопризнаковые объекты $A_1, \dots, A_p$ рассматриваются как точки метрического пространства мультимножеств с некоторой метрикой [9], которые сравниваются и упорядочиваются по показателю относительной близости к наилучшему (идеальному) объекту A_+ или наихудшему (антиидеальному) A_- в этом пространстве. Наилучший и наихудший объекты (которые могут

быть и гипотетическими) имеют соответственно самые высокие и самые низкие оценки по всем критериям. Все объекты упорядочиваются по близости к наилучшему объекту A_+ , по удаленности от наихудшего объекта A_- или по значению показателя относительной близости к наилучшему объекту $l(A_q) = d(A_+, A_q) / [d(A_+, A_q) + d(A_-, A_q)]$, где $d(A_+, A_q)$ расстояние до наилучшего объекта A_+ и $d(A_-, A_q)$ расстояние до наихудшего объекта A_- .

Блок-схема решения задачи многокритериального выбора с последовательным снижением размерности признакового пространства состоит из следующих шагов (Рис. 1).

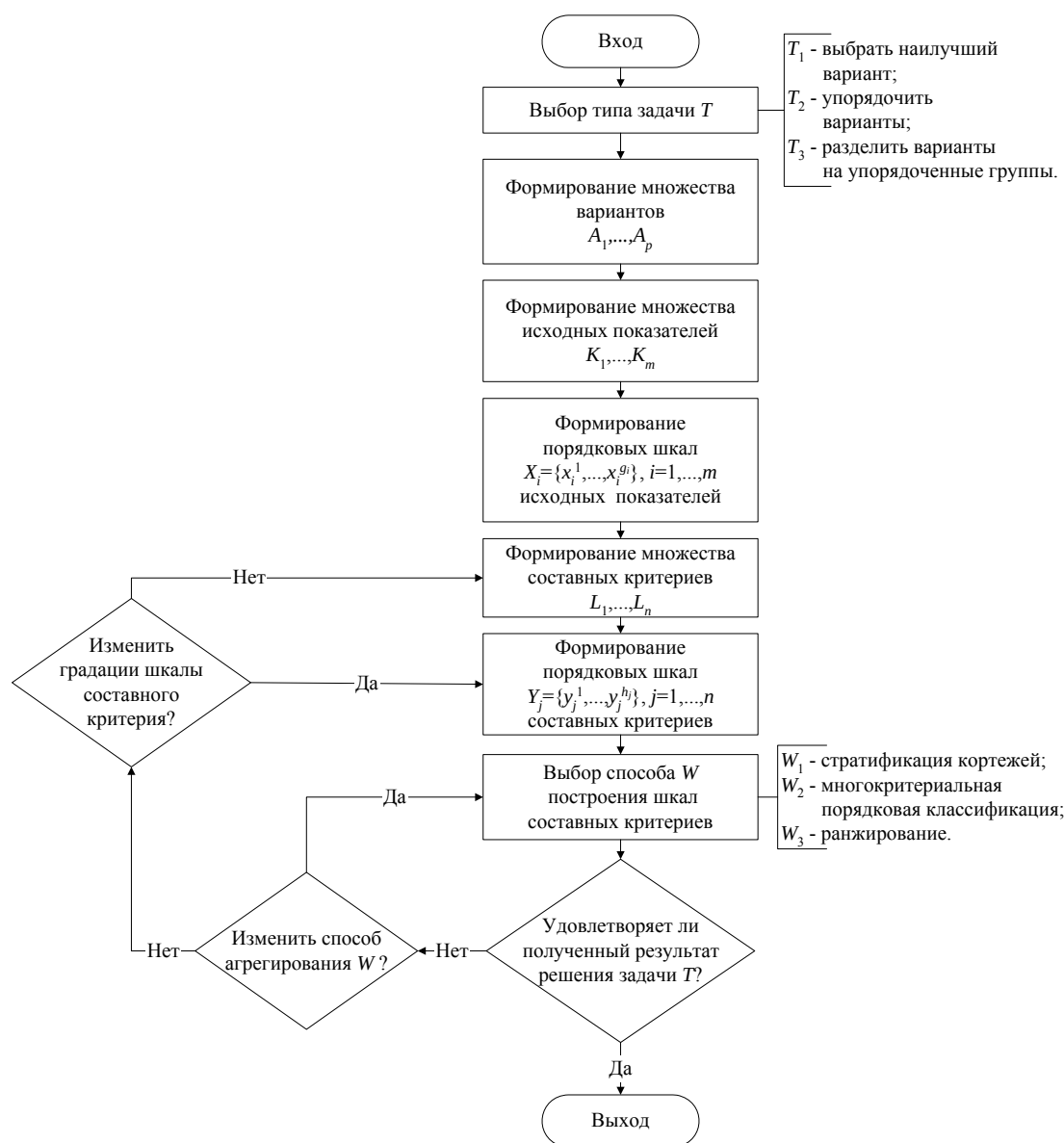


Рис. 1. Блок-схема многоэтапной технологии ПАКС

Шаг 1. Выбрать тип задачи T . Возможны следующие задачи: T_1 – выбрать лучший вариант; T_2 – упорядочить варианты; T_3 – разделить варианты на упорядоченные группы.

Шаг 2. Сформировать множество вариантов $A_1, \dots, A_p$, $p \geq 2$ решения задачи T .

Шаг 3. Сформировать множество исходных показателей (признаков) $K_1, \dots, K_m$, $m \geq 2$.

Шаг 4. Сформировать порядковые шкалы $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^{g_i}\}$, $i=1, \dots, m$ исходных показателей в зависимости от типа задачи T .

Шаг 5. Сформировать множество составных критериев $L_1, \dots, L_n$, $n < m$, т.е. интегральных показателей, определяющих выбранное ЛПР свойство вариантов, которые агрегируют исходные характеристики $K_1, \dots, K_m$.

Шаг 6. Сформировать порядковые шкалы $Y_j = \{y_j^1, \dots, y_j^{h_j}\}$, $j=1, \dots, n$ составных критериев. Каждая градация шкалы составного критерия является комбинацией градаций оценок исходных показателей.

Шаг 7. Выбрать способ W построения шкал составных критериев (агрегирования показателей). Возможны следующие способы: W_1 – стратификация кортежей; W_2 – многокритериальная порядковая классификация кортежей; W_3 – ранжирование кортежей.

Шаг 8. Построить шкалы составных критериев всех иерархических уровней, включая верхний уровень, используя несколько разных методов агрегирования показателей и/или комбинаций методов.

Шаг 9. Решить задачу T (по многим критериям выбрать лучший вариант, упорядочить варианты, построить порядковую классификацию вариантов). Если получен удовлетворительный результат решения, то алгоритм завершает работу, иначе переход к шагу 10.

Шаг 10. Если результат, полученный на шаге 9, не удовлетворяет ЛПР, то предлагается либо изменить способ построения шкалы составного критерия W (переход к шагу 7), либо изменить градации шкалы составного критерия (переход к шагу 6), либо сформировать новое множество составных критериев Y (переход к шагу 5).

Эффективность технологии ПАКС при решении задач многокритериального выбора и классификации может оцениваться по-разному в зависимости от типа задачи T . Например, применительно к задачам ранжирования под оценкой эффективности понимается соотношение

числа несравнимых альтернатив до и после снижения размерности. В задачах классификации эффективность оценивается числом обращений к ЛПР, необходимых для построения полной непротиворечивой классификации. Соответственно можно сравнивать число обращений к ЛПР при решении задачи классификации на исходном и новом пространстве признаков. Однако для задач классификации большой размерности такой подход не всегда является приемлемым, т.к. построить полную непротиворечивую классификацию на исходном признаковом пространстве в ряде случаев просто не представляется возможным. Это связано с тем, что с ростом размерности признакового пространства растет как число объектов, представляемых ЛПР для классификации, так и их сложность.

3. Агрегирование качественных признаков в пространстве сниженной размерности

Формально задача снижения размерности признакового пространства имеет следующий вид:

$$X_1 \times \dots \times X_m \rightarrow Y_1 \times \dots \times Y_n, \quad n < m,$$

где $X_1, \dots, X_m$ – исходный набор признаков, $Y_1, \dots, Y_n$ – новый набор признаков, m – размерность исходного признакового пространства, n – размерность нового признакового пространства. Каждый из признаков имеет свою собственную шкалу $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^{g_i}\}$, $i=1, \dots, m$, $Y_j = \{y_j^1, \dots, y_j^{h_j}\}$, $j=1, \dots, n$ с упорядоченной градацией качественных (символьных, вербальных) оценок.

Будем рассматривать задачу снижения размерности признакового пространства как задачу многокритериальной классификации, в которой различные комбинации исходных признаков (кортежи оценок) последовательно агрегируются в меньшие наборы новых признаков, имеющих для ЛПР вполне определенный смысл. Итогом является иерархическая система критериев, верхний уровень которой определяется содержанием практической проблемы.

Процедура агрегирования показателей обладает многоуровневой иерархической структурой со «слабыми» связями, в которой элемент нижележащего уровня (оценки по исходным показателям) подчинен двум и более вершинам

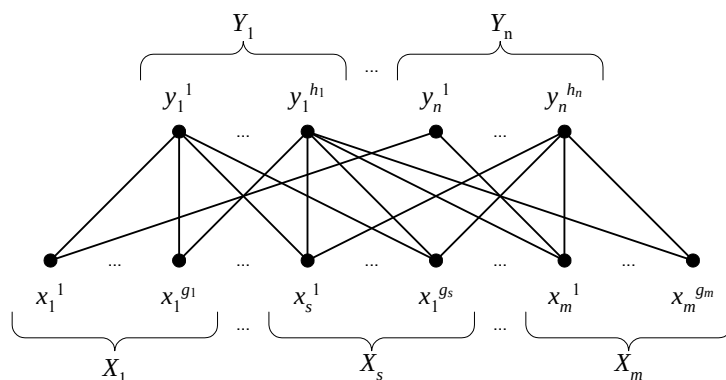


Рис. 2. Структура типового блока построения шкалы составного критерия i -го уровня иерархии

вышестоящего уровня (оценкам по составным критериям). Переходя шаг за шагом на более высокий уровень иерархии, ЛПР может сконструировать приемлемые для него составные критерии вплоть до одного единственного.

Представим процесс построения шкал составных критериев в виде однотипных блоков. Блоки содержательно выделяются ЛПР в зависимости от специфики решаемой задачи. Каждый блок классификации i -го уровня иерархии состоит из некоторого набора признаков и одного составного критерия. В качестве объектов классификации выступают все градации оценок на шкалах признаков. Классами решений i -го уровня служат градации оценок на шкале составного критерия.

В блоке классификации $(i+1)$ -го уровня иерархии составные критерии i -го уровня считаются признаками, множество градаций оценок которых представляет собой новые объекты классификации в сокращенном признаковом пространстве, а классами решений будут теперь градации оценок на шкале составного критерия $(i+1)$ -го уровня. Процедура повторяется до тех пор, пока не останется единственный составной критерий верхнего уровня, являющийся искомым интегральным показателем, шкала оценок которого образует упорядоченные классы решений $D_1, \dots, D_q$. Тем самым устанавливается соответствие между классами решений $D_1, \dots, D_q$ и совокупностью исходных показателей – множеством $X_1 \times \dots \times X_m$ всех возможных комбинаций градаций оценок на шкалах критериев $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^{g_i}\}$, $i=1, \dots, m$, и находятся границы классов, что позволяет легко построить классификацию реальных вариантов (альтернатив) $A_1, \dots, A_p$, оцененных по многим критериям $K_1, \dots, K_m$.

Каждый блок i -го уровня иерархии представляет собой связный двудольный граф $G_i = (U, E)$, где U – вершины графа, E – дуги (Рис. 2). Множеством вершин $U = X \cup Y$ являются множества значений исходных признаков $X = X_1 \cup \dots \cup X_m$ и градаций шкал составных критериев $Y = Y_1 \cup \dots \cup Y_n$. Дуги E графически выражают наборы решающих правил, на основании которых выстраиваются кортежи оценок, формирующих градации шкал составных критериев (фактически – это одна из форм смысловой интерпретации предпочтений ЛПР).

Между вершинами, относящимся к разным множествам, имеются кратные дуги, т.е. граф G_i является мультиграфом. Кратность дуг графа G_i дает возможность представить градацию $y_j^{f_j}$ ($f_j=1, \dots, h_j$, $j=1, \dots, n$) шкалы составного критерия Y_j как множество с повторяющимися элементами или мультимножество [9]:

$$A_{fj} = \{k_{A_{fj}}(x_1^1) \circ x_1^1, \dots, k_{A_{fj}}(x_1^{g_1}) \circ x_1^{g_1}, \dots, k_{A_{fj}}(x_m^1) \circ x_m^1, \dots, k_{A_{fj}}(x_m^{g_m}) \circ x_m^{g_m}\},$$

где $k_{A_{fj}}(x_i^{e_i})$ указывает сколько раз значение исходного признака $x_i^{e_i}$ ($e_i=1, \dots, g_i$, $i=1, \dots, m$) встречается в кортежах, которые формируют градацию шкалы составного критерия $y_j^{f_j}$; знак $\circ$ обозначает кратность оценки $x_i^{e_i}$. Использование понятий мультиграфа и мультимножества позволяет построить единую схему формализации понятия составного критерия и по-новому решать как известные задачи, в которых есть определенные сложности, например, задачи распознавания иерархических структур, так и новые виды задач.

Для формирования шкал оценок по составным критериям ЛПР может воспользоваться несколькими способами из арсенала средств вербального анализа решений. Наиболее

простым и легко воспринимаемым ЛПР способом конструирования порядковой шкалы составного критерия является метод стратификации кортежей, в котором используются однотипные (например, с одинаковым числом градаций) наборы порядковых вербальных шкал исходных показателей. Аналогично методам векторной стратификации [2] метод стратификации кортежей основан на сечении многомерного дискретного признакового пространства параллельными гиперплоскостями. Каждый слой (страта) состоит из однотипных комбинаций градаций оценок на шкалах критериев X_i , а число таких сечений определяется ЛПР из содержательных соображений. Максимально возможное число слоев можно рассчитать по формуле $s=1-m+\sum_{i=1}^m g_i$. Каждый слой образуется как комбинация кортежей градаций оценок, сумма номеров которых фиксирована. Число классов $r \leq s$. В более сложных процедурах построения шкал критериев используются методы вербального анализа решений ЗАПРОС или ОРКЛАСС [5, 11], которые оперируют на множестве всех возможных кортежей оценок в признаковом пространстве, образованном декартовым произведением градаций оценок на шкалах критериев $X_1 \times \dots \times X_m$. В этих случаях число возможных комбинаций оценок (альтернатив) равно $t = \prod_{i=1}^m g_i$.

Рассмотрим небольшой иллюстративный пример. Пусть ЛПР необходимо построить шкалу составного критерия D из градаций оценок базовых показателей A , B и C . Допустим, что все критерии A , B , C и D имеют шкалы

с тремя вербальными градациями порядковых оценок $A=\{a^0, a^1, a^2\}$, $B=\{b^0, b^1, b^2\}$, $C=\{c^0, c^1, c^2\}$ и $D=\{d^0, d^1, d^2\}$, где e^0 – отлично, e^1 – средне, e^2 – плохо.

Применяя для построения порядковой шкалы составного критерия метод стратификации кортежей, ЛПР может, к примеру, объединить градации оценок исходных критериев в обобщенные градации составного критерия по такому принципу: все лучшие оценки по базовым показателям образуют одну лучшую оценку по составному критерию, все средние оценки – одну среднюю оценку, все худшие оценки – одну худшую оценку (Рис. 3).

Воспользовавшись методом ЗАПРОС, ЛПР может сконструировать единую порядковую шкалу составного критерия, градации которой формируются из оценок по отдельным исходным показателям, и выделить на ней градации шкалы составного критерия (Рис. 4).

С помощью метода ОРКЛАСС строится полная непротиворечивая порядковая классификация многопризнаковых объектов, в качестве которых в рассматриваемом случае выступают наборы градаций оценок по исходным показателям, образующим составной критерий (Рис. 5). Получаемые классы решений соответствуют градациям шкалы составного критерия.

В общем случае для построения шкал составных критериев можно использовать практически любой метод ранжирования или классификации многокритериальных альтернатив, позволяющий представить каждую градацию шкалы составного критерия в виде комбинации градаций оценок базовых показателей. Такой

Страты кортежей	$a^0 b^0 c^0$	$a^0 b^0 c^1$	$a^0 b^0 c^2$	$a^0 b^1 c^0$	$a^0 b^1 c^1$	$a^0 b^1 c^2$	$a^0 b^2 c^0$	$a^0 b^2 c^1$	$a^0 b^2 c^2$
	$a^1 b^0 c^0$	$a^1 b^0 c^1$	$a^1 b^0 c^2$	$a^1 b^1 c^0$	$a^1 b^1 c^1$	$a^1 b^1 c^2$	$a^1 b^2 c^0$	$a^1 b^2 c^1$	$a^1 b^2 c^2$
	$a^2 b^0 c^0$	$a^2 b^0 c^1$	$a^2 b^0 c^2$	$a^2 b^1 c^0$	$a^2 b^1 c^1$	$a^2 b^1 c^2$	$a^2 b^2 c^0$	$a^2 b^2 c^1$	$a^2 b^2 c^2$
Составной критерий D									

Рис.3. Конструирование шкалы составного критерия с помощью метода стратификации кортежей

Единая шкала	$a^0 b^0 c^0 > a^0 b^0 c^1 = a^0 b^1 c^0 > a^2 b^0 c^0 > a^0 b^2 c^0$	$a^0 b^0 c^0 > a^0 b^0 c^1 > a^0 b^0 c^2 > a^1 b^0 c^0 > a^2 b^0 c^0$	$a^0 b^0 c^0 > a^0 b^0 c^1 > a^0 b^0 c^2 > a^0 b^1 c^0 > a^0 b^2 c^0$
	$a^0 b^0 c^0 > a^0 b^0 c^1$	$a^0 b^0 c^2 > a^1 b^0 c^0 = a^0 b^1 c^0 >$	$a^2 b^0 c^0 > a^0 b^2 c^0$
	d^0	d^1	d^2
Составной критерий D			

Рис. 4. Конструирование шкалы составного критерия с помощью метода ЗАПРОС

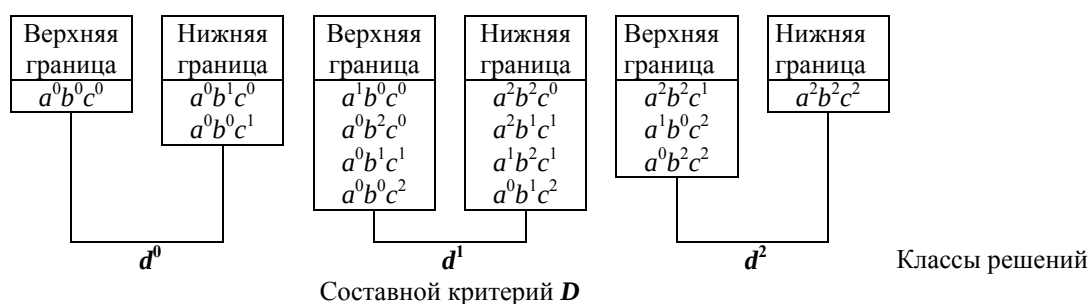


Рис. 5. Конструирование шкалы составного критерия с помощью метода ОРКЛАСС

подход позволяет при решении конкретной практической задачи выбрать как наиболее предпочтительный набор составных критериев, так и метод или совокупность методов их построения.

Новый методологический подход к снижению размерности пространства качественных признаков обладает определенной универсальностью, так как в общем случае позволяет оперировать как с символьной (качественной), так и с числовой (количественной) информацией, представляя каждую градацию шкалы составного (агрегированного) критерия в виде комбинации градаций оценок исходных показателей. Привлекательной особенностью предложенного подхода к снижению размерности признакового пространства является возможность его использования в сочетании с другими методами принятия решений и технологиями обработки информации.

4. Оценка результативности научных проектов

В качестве примера использования технологии ПАКС рассмотрим задачу многокритериальной оценки результативности проектов целевых фундаментальных исследований, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) и выполняемых в интересах федеральных агентств и ведомств [14]. В РФФИ накоплен значительный опыт в организации и проведении экспертизы фундаментальных исследований и полученных результатов, представляющих интерес с позиций их практического применения.

В соответствии с действующим в РФФИ порядком экспертиза проектов проводится в несколько этапов и сочетает в себе индивидуальную оценку независимых экспертов и последующее коллективное обсуждение заявок.

Первоначально каждый проект рассматривается несколькими экспертами, которые дают письменные аргументированные заключения и многокритериальную оценку содержания заявки (при проведении конкурсного отбора) и полученных результатов (при завершении проекта). Содержание заявки и полученных результатов оцениваются по специальным экспертным анкетам, которые содержат критерии, имеющие словесные шкалы оценок с развернутыми формулировками градаций качества. По каждому критерию эксперт выбирает только одну из имеющихся градаций оценок.

В дальнейшем заявки и отчеты обсуждаются в экспертном совете РФФИ по соответствующей области знаний, который с учетом заключений экспертов принимает решение о принятии проекта, продолжении выполнения или отклонении проекта, объемах его финансирования. В разных видах конкурсов используются свои наборы критериев оценки, но во всех конкурсах шкалы критериев имеют вербальные (качественные) градации. Такой подход позволяет оперировать оценками, в определенной степени унифицированными для представителей разных областей знаний, и получить от экспертов более достоверную информацию.

Одним из важных направлений деятельности РФФИ в настоящее время является оценка возможностей практического применения результатов научных исследований в отраслях экономики [15]. Для выявления наиболее результативных проектов целевых фундаментальных исследований необходимо было формализовать само понятие «результативность проекта». Результативность проектов может рассматриваться как с позиций непосредственного применения полученных результатов на практике, так и для формирования целевых программ. При формализации результативности целевых фундаментальных исследований за

исходные показатели были приняты критерии, содержащиеся в анкете РФФИ для экспертной оценки отчета о выполнении проекта, которые учитываются при формировании интегрального показателя результативности проекта.

Анкета экспертизы отчета состоит из двух разделов: оценка полученных результатов и ожидаемые результаты завершающей стадии проекта. Раздел «Оценка полученных результатов проекта» включает 4 критерия: K_1 . Степень выполнения заявленных задач проекта; K_2 . Оценка научного уровня полученных результатов; K_3 . Патентоспособность полученных результатов; K_4 . Перспективы использования полученных результатов. Раздел «Ожидаемые результаты завершающей стадии проекта» характеризует возможности практической реализации проекта и состоит из 4 критериев: K_5 . Ожидаемые результаты завершающего этапа выполнения проекта; K_6 . Решение задач, поставленных в завершающей части проекта; K_7 . Наличие трудностей в работе по проекту; K_8 . Взаимодействие с организациями, в которых предполагается использовать результаты проекта (заполняется только для итогового отчета).

Каждый критерий имеет порядковую или номинальную шкалу оценок с двумя или тремя развернутыми словесными формулировками градаций качества. Например, степень выполнения заявленных в проекте задач оценивается по критерию K_1 как 0 – задачи выполнены полностью, 1 – задачи выполнены частично, 2 – задачи не выполнены. Решение задач, поставленных в завершающей части проекта, оценивается по критерию K_6 как 0 – реально или 1 – нереально.

Итак, множество объектов (научных проектов) исходно описывается восемью показателями (критериями) $K_1, \dots, K_8$, которые имеют следующие шкалы: $X_1 = \{0, 1, 2\}$; $X_2 = \{0, 1, 2\}$; $X_3 = \{0, 1\}$; $X_4 = \{0, 1, 2\}$; $X_5 = \{0, 1\}$; $X_6 = \{0, 1\}$; $X_7 = \{0, 1\}$; $X_8 = \{0, 1, 2\}$, где 0 обозначает лучшую оценку, 1 – среднюю (или худшую), 2 – худшую. Таким образом, размерность исходного признакового пространства $X_1 \times \dots \times X_8$ равна 1296. Критерием верхнего уровня является «Результативность проекта», градации оценок по шкале которого (наивысшая, высокая, средняя, низкая, неудовлетворительная) определяют упорядоченные классы решений $D_1, \dots, D_5$. Требуется разбить множество комбинаций градаций оценок на пять классов результативности

$D_1 \succ \dots \succ D_5$. Очевидно, что непосредственная классификация 1296 вариантов связана с существенными трудозатратами ЛПР.

Построение интегрального показателя результативности научного проекта рассматривается как решение задачи многокритериальной порядковой классификации по иерархической системе критериев, которая строится с помощью технологии ПАКС путем снижения размерности признакового пространства. В качестве многопризнаковых объектов выступают комбинации градаций оценок проектов по критериям, агрегированные показатели играют роль классов решений. ЛПР имеет возможность различным образом формировать понятие «результативность проекта» и сравнивать интегральные показатели, сконструированные различными способами. Было предложено два способа агрегирования множества комбинаций исходных градаций оценок по критериям в промежуточные составные критерии, градации оценок по которым, в свою очередь, агрегировались в интегрированный критерий верхнего уровня.

Первый способ формирования иерархической системы критериев состоит во введении трех составных критериев: AK_1 . Уровень полученных результатов, AK_2 . Уровень ожидаемых результатов завершающей стадии проекта и AK_3 . Возможности использования результатов в программах федеральных агентств и ведомств. Составной критерий AK_1 объединяет исходные оценки по критериям K_1 , K_2 и K_3 ; составной критерий AK_2 – оценки по критериям K_5 , K_6 и K_7 ; составной критерий AK_3 – оценки по критериям K_4 и K_8 (Рис. 6).

Для составных критериев AK_1 , AK_2 , AK_3 заданы порядковые шкалы с тремя градациями: $Y_1 = \{0, 1, 2\}$, $Y_2 = \{0, 1, 2\}$, $Y_3 = \{0, 1, 2\}$, где значения 0, 1, 2 являются вербальными оценками (высокая, средняя, низкая), определяемыми содержанием соответствующих составных критериев, и выступают как классы решений первого иерархического уровня. Совокупности кортежей $(x_1^{e1}, x_2^{e2}, x_3^{e3})$, $(x_5^{e5}, x_6^{e6}, x_7^{e7})$, (x_4^{e4}, x_8^{e8}) выступают в качестве классифицируемых объектов первого уровня.

Рассмотрим теперь наборы всех градаций оценок по составным критериям $(y_1^{f1}, y_2^{f2}, y_3^{f3})$ в пространстве $Y_1 \times Y_2 \times Y_3$ как новые классифицируемые объекты следующего иерархического

уровня. Классами решений $D_1, \dots, D_5$ являются градации оценок шкалы $Z = \{z^1, z^2, z^3, z^4, z^5\}$ составного критерия верхнего уровня иерархии. Здесь z_1 – наивысшая результативность (класс D_1), z_2 – высокая результативность (класс D_2), z_3 – средняя результативность (класс D_3), z_4 – низкая результативность (класс D_4), z_5 – неудовлетворительная результативность (класс D_5). Агрегируя градации оценок по критериям AK_1, AK_2, AK_3 , получим соответствующие оценки для шкалы Z показателя результативности.

Шкалы составных критериев конструировались ЛПР с помощью методов стратификация кортежей и ОРКЛАСС. Градации шкал оценок для составных критериев AK_1 , AK_2 , AK_3 , сформированные методом ОРКЛАСС, представлены соответственно на Рис. 7 а, б, в. К классу 0 «Высокий уровень полученных результатов» (градация $y_1^1=0$) относится следующая комбинация оценок: (000), (001), (010), (100); к классу 1 «Средний уровень полученных результатов» (градация $y_1^2=1$) – комбинации оценок (011), (021), (101), (111), (201), (110), (200), (020), (210), (120); к классу 2 «Низкий уровень полученных результатов» (градация $y_1^3=2$) – комбинация оценок (121), (211), (221), (220). Здесь и далее для простоты записи опущены запятые между компонентами векторов оценок.

Класс 0 «Высокий уровень ожидаемых результатов» (градация $y_2^1=0$) образует комбинация всех лучших оценок (000); класс 1 «Средний уровень ожидаемых результатов» (градация $y_2^2=1$) – комбинации оценок (001), (011), (101), (100), (010), (110); класс 2 «Низкий уровень ожидаемых результатов» (градация $y_2^3=2$) – комбинация всех худших оценок (111).

Класс 0 «Большие возможности использования результатов» (градация $u_3^1=0$) составляют все лучшие оценки (00); класс 1 «Средние возможности использования результатов» (градация $u_3^2=1$) – комбинации оценок (01), (10), (02),

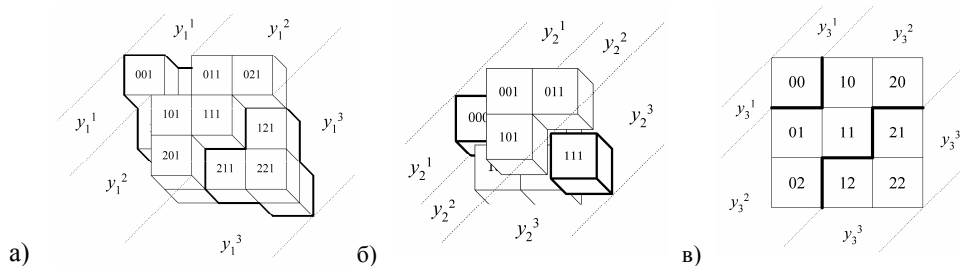


Рис. 7. Схема формирования шкал оценок для составных критериев AK_1 , AK_2 и AK_3

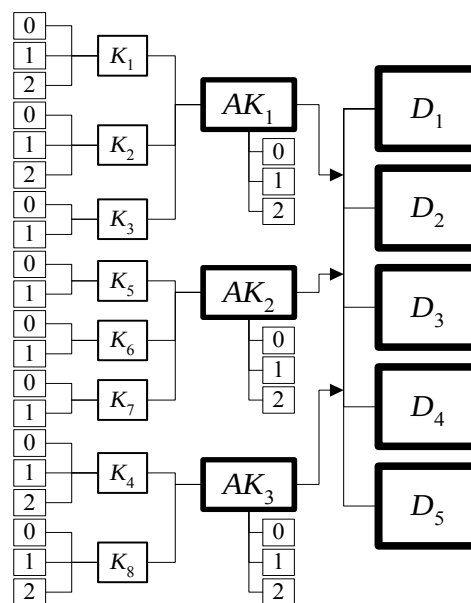
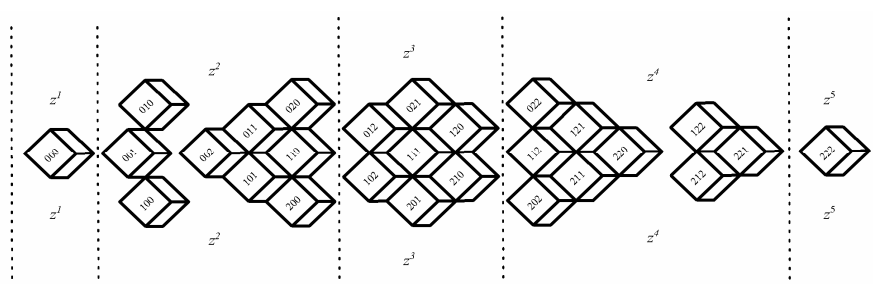


Рис. 6. Схема построения критериев и формирования шкал оценок

(11), (20); класс 2 «Малые возможности использования результатов» (градация $y_3^3=2$) – комбинации оценок (12), (21), (22).

Комбинации градаций оценок по составным критериям AK_1 , AK_2 , AK_3 агрегировались далее с помощью метода стратификации кортежей. С геометрической точки зрения эта процедура состоит в «нарезке» многомерного параллелепипеда (прямоугольника) в пространстве исходных признаков на группы признаков составного критерия. К примеру, класс D_1 «Наивысшая результативность» (градация z^1) состоит из всех лучших оценок (000); класс D_2 «Высокая результативность» (градация z^2) – из комбинаций оценок (100), (010), (001), (002), (101), (011), (200), (110), (020); класс D_3 «Средняя результативность» (градация z^3) – из комбинаций оценок (102), (012), (201), (111), (021), (210), (120); класс D_4 «Низкая результативность» (градация z^4) – из комбинаций оценок (202), (112), (022),

Рис. 8. Схема формирования шкалы оценок для интегрального критерия D

(211), (121), (220), (212), (122), (221); класс D_5 «Неудовлетворительная результативность» (градация z^5) – из всех худших оценок (222). Градации оценок для шкалы Z критерия D приведены на Рис. 8.

Другой возможный способ формирования иерархической системы критериев воспроизводит структуру анкеты экспертизы отчета. Разделам «Оценка полученных результатов» и «Ожидаемые результаты завершающей стадии проекта» сопоставлены два составных критерия BK_1 и BK_2 . В таком случае исходные оценки по критериям K_1, K_2, K_3, K_4 попадают в составной критерий BK_1 , а исходные оценки по критериям K_5, K_6, K_7, K_8 – в составной критерий BK_2 . Критерии BK_1 и BK_2 имеют порядковые шкалы с четырьмя вербальными градациями: высокая, хорошая, средняя, низкая, которые выступают как классы решений первого уровня для исходных признаков (критериев). Наборы всех градаций оценок по составным критериям BK_1 и BK_2 считаются далее объектами классификации следующего уровня, где классами решений $D_1, \dots, D_5$ являются градации шкалы оценок составного критерия верхнего уровня иерархии $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5\}$.

Таким образом, реальные варианты, имеющие оценки по исходным критериям, непосредственно относятся при классификации к сформированным классам решений. При первом способе конструирования интегрального показателя результативности для построения конечных классов решений $D_1, \dots, D_5$ ЛПР давал ответы при построении шкал составных критериев AK_1, AK_2, AK_3 – соответственно на 16, 6 и 7 вопросов, шкалы Z агрегированного критерия – на 22 вопроса. При втором способе конструирования интегрального показателя результативности для формирования конечных классов решений $D_1, \dots, D_5$ потребовалось получить от ЛПР ответы соответственно на 43 и 17 вопро-

сов при построении шкал составных критериев BK_1 и BK_2 , ответы на 12 вопросов при построении шкалы Z агрегированного критерия. Приведенные числа задаваемых ЛПР вопросов существенно меньше, чем при использовании других методов многокритериальной порядковой классификации.

Разработанный подход к анализу результативности целевых фундаментальных исследований был апробирован на массиве реальных экспертных оценок отчетов по проектам, законченным в 2007 году в областях знаний 01. Математика, информатика и механика (48 проектов), 03. Химия (54 проекта), 07. Информационные и телекоммуникационные ресурсы (21 проект). Каждый отчет оценивался двумя экспертами по восьми исходным критериям $K_1 - K_8$. Интегральный показатель верхнего уровня D . «Результативность проекта» конструировался двумя способами, описанными выше: объединяя критерии K_1-K_3, K_5-K_7 , и K_4, K_8 в три промежуточных составных критерия AK_1, AK_2, AK_3 ; агрегируя оценки по критериям K_1-K_4 и K_5-K_8 в два промежуточных составных критерия BK_1 и BK_2 .

Градации шкалы интегрального показателя (классы результативности проектов) были построены с помощью четырех комбинаций различных методов вербального анализа решений: M_1 – метод ОРКЛАСС на всех уровнях иерархии критериев (ОК); M_2 – метод стратификации кортежей на всех уровнях иерархии критериев (СК); M_3 – стратификация кортежей на нижнем уровне иерархии критериев и ОРКЛАСС на верхнем уровне иерархии критериев (СК+ОК); M_4 – ОРКЛАСС на нижнем уровне иерархии критериев и стратификация кортежей на верхнем уровне иерархии критериев (ОК+СК). Пример распределения проектов по классам результативности, основанный на многокритериальных оценках двух экспертов, показан на Рис.9.

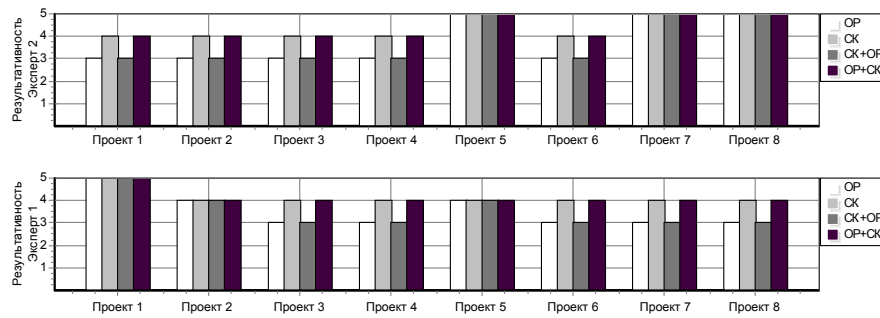


Рис. 9. Пример распределения проектов по классам результативности

Анализ оценок результативности проектов показал следующее. Например, по области 03 наивысшую результативность имеют при первом способе конструирования интегрального показателя результативности 6 проектов, а при втором способе 16 проектов; высокую результативность – соответственно 40 и 75 проектов; среднюю результативность – 59 и 13 проектов; низкую результативность – 1 и 2 проекта; неудовлетворительную результативность – 2 и 2 проекта. Таким образом, второй способ агрегирования оценок по критериям дает более высокое значение интегрального показателя результативности, чем первый способ.

В целом по оценкам двух экспертов значения интегрального показателя результативности совпадают в 74% и 48% случаях (по области 01); в 72% и 24% случаях (по области 03); в 76% и 62% случаях (по области 07). Первое число относится к оценкам первого эксперта, второе – второго. В остальных случаях значения интегрального показателя результативности отличались не более чем на одну градацию, что можно рассматривать как свидетельство достаточно высокой устойчивости итоговых результатов оценки результативности проектов по исходным данным и выбранным способам построения шкал составных критериев на всех уровнях иерархии.

Для определения лучших по результативности проектов использовался метод АРАМИС. Оценки результативности проекта, полученные с помощью одной из комбинаций методов M_1, M_2, M_3, M_4 , считались новыми признаками, характеризующими проект. Каждый такой признак M_j может принимать одно из значений $m_j^1, m_j^2, m_j^3, m_j^4, m_j^5$, которые соответствуют классам D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 результативности проекта. Тогда каждый проект A_q представляется мультимножеством вида

$$A_q = \{k_{Aq}(m_1^1) \circ m_1^1, \dots, k_{Aq}(m_1^5) \circ m_1^5; \dots; k_{Aq}(m_4^1) \circ m_4^1, \dots, k_{Aq}(m_4^5) \circ m_4^5\}$$

над множеством методов $M = M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4$. Здесь кратность $k_{Aq}(m_j^{h_j})$, $h_j = 1, \dots, 5$, $j = 1, \dots, 4$ каждого значения признака в мультимножестве A_q показывает, сколько раз метод $m_j^{h_j}$ использовался при формировании соответствующего класса результативности по оценкам всех экспертов; знак $\circ$ обозначает, что признак $m_j^{h_j}$ встречается $k_{Aq}(m_j^{h_j})$ раз в описании проекта A_q .

К примеру, проекты 1 и 2, показанные на Рис.9, описываются как мультимножества

$$A_1 = \{1 \circ m_1^1, 0 \circ m_1^2, 1 \circ m_1^3, 0 \circ m_1^4, 0 \circ m_1^5; 1 \circ m_2^1, 1 \circ m_2^2, 0 \circ m_2^3, 0 \circ m_2^4, 0 \circ m_2^5; 1 \circ m_3^1, 0 \circ m_3^2, 1 \circ m_3^3, 0 \circ m_3^4, 0 \circ m_3^5; 1 \circ m_4^1, 1 \circ m_4^2, 0 \circ m_4^3, 0 \circ m_4^4, 0 \circ m_4^5\},$$

$$A_2 = \{0 \circ m_1^1, 1 \circ m_1^2, 1 \circ m_1^3, 0 \circ m_1^4, 0 \circ m_1^5; 0 \circ m_2^1, 2 \circ m_2^2, 0 \circ m_2^3, 0 \circ m_2^4, 0 \circ m_2^5; 0 \circ m_3^1, 1 \circ m_3^2, 1 \circ m_3^3, 0 \circ m_3^4, 0 \circ m_3^5; 0 \circ m_4^1, 2 \circ m_4^2, 0 \circ m_4^3, 0 \circ m_4^4, 0 \circ m_4^5\},$$

а наилучший A_+ и наихудший A_- проекты (возможно, и гипотетические), имеющие самые высокие и самые низкие значения оценок по всем признакам, – как мультимножества

$$A_+ = \{2 \circ m_1^1, 0, \dots, 0; 2 \circ m_2^1, 0, \dots, 0; 2 \circ m_3^1, 0, \dots, 0; 2 \circ m_4^1, 0, \dots, 0\},$$

$$A_- = \{0, \dots, 0, 2 \circ m_1^5; 0, \dots, 0, 2 \circ m_2^5; 0, \dots, 0, 2 \circ m_3^5; 0, \dots, 0, 2 \circ m_4^5\}.$$

Итоговое упорядочение проектов по результативности, например, по области знаний 01. Математика, информатика и механика, выглядит так: 23 проекта имеют наивысшую результативность, 23 проекта – высокую результативность, 1 проект – результативность, промежуточную между наивысшей и высокой.

Результаты апробации подтвердили эффективность предложенного подхода. Были выявлены проекты целевых фундаментальных исследований, имеющие высокую результативность, что обеспечивает расширение сферы практического применения результатов законченных работ.

Заключение

Предложен новый методологический подход к решению задач многокритериального выбора, в котором процедуры снижения размерности пространства признаков сочетаются с использованием нескольких различных методов вербального анализа решений и/или их комбинаций. Важной особенностью разработанной технологии ПАКС является возможность сформировать разные наборы промежуточных составных критериев и воспользоваться разными способами конструирования их шкал. Сопоставление результатов, получаемых для разных иерархических систем критериев, позволяет ЛПР сравнить их между собой и выбрать как наиболее предпочтительную систему критериев, так и оценить качество сделанного выбора.

Последовательное распределение всех критериев по отдельным группам дает возможность «распараллелить» решение задачи, что обеспечивает ощутимую экономию трудозатрат ЛПР. Применение процедуры иерархического агрегирования признаков, имеющей блочный характер, позволяет значительно снизить размерность исходного признакового пространства, что существенно сокращает время, затраченное ЛПР, для решения задачи многокритериального выбора.

Технология ПАКС была использована для оценки результативности научных проектов. Получение интегрального показателя результативности сведено к решению задачи многокритериальной порядковой классификации по иерархической системе критериев с последовательным уменьшением размерности признакового пространства. В качестве многопризнаковых объектов выступают комбинации экспертных оценок проектов по принятым в РФФИ критериям, интегральные показатели играют роль классов решений. Технология может быть успешно применена в различных проблемных областях, где необходимо получить интегральный показатель оценки деятельности на основе исходной слабо структурируемой качественной информации. Примером такой задачи может служить многоаспектный сопоставительный анализ современного состояния и тенденций развития регионов России, опирающийся на разнообразные данные, которые отражают культурно-исторические, экономические, социальные, общественно-политические характеристики регионов.

Предложенная технология решения задач многокритериального выбора, в частности, путем формирования интегральных показателей, обеспечивает систематизацию имеющейся информации, облегчает выбор окончательного варианта решения, дает возможность проанализировать и обосновать итоговые результаты.

Литература

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / Под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989.
2. Глотов В.А., Павельев В.В. Векторная стратификация. – М.: Наука, 1984.
3. Канеман Д., Словик П., Тверски А. Принятие решений в неопределенности: правила и предубеждения. – Харьков: Гуманитарный центр, 2005.
4. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981.
5. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. / Под ред. А.Б. Петровского. – М.: Наука, 2006.
6. Ларичев О.И., Прохоров А.С., Петровский А.Б., Стернин М.Ю., Шепелев Г.И. Опыт планирования фундаментальных исследований на конкурсной основе. // Вестник АН СССР, 1989, № 7, С.51-61.
7. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физматлит, 2005.
8. Ногин В.Д. Проблема сужения множества Парето: подходы к решению // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008, № 1, С. 98-112.
9. Петровский А.Б. Пространства множеств и мультимножеств. – М.: Едиториал УРСС, 2003.
10. Петровский А.Б. Модель оценки кредитоспособности владельцев кредитных карт по противоречивым данным. // Искусственный интеллект, 2004, №2, С.155-161.
11. Петровский А.Б. Теория принятия решений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009.
12. Петровский А.Б. Методы групповой классификации многопризнаковых объектов (части 1 и 2). // Искусственный интеллект и принятие решений, 2009, №3, С.3-14; №4, С.3-14.
13. Петровский А.Б., Ройзензон Г.В. Интерактивная процедура снижения размерности признакового пространства в задачах многокритериальной классификации // Поддержка принятия решений. Труды Института системного анализа Российской академии наук. / Под ред. А.Б.Петровского. Т.35. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008, С.43-53.
14. Петровский А.Б., Ройзензон Г.В., Тихонов И.П., Балышев А.В. Многокритериальная оценка результативности научных проектов. // Третья Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии»: Труды конференции. – М.: ПолиПринт Сервис, 2009, С.329-336.
15. Петровский А.Б., Тихонов И.П. Фундаментальные исследования, ориентированные на практический

- результат: подходы к оценке эффективности. // Вестник РАН, 2009, Т.79, №11, С.1006-1011.
16. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. – М.: Физматлит, 2007.
 17. Ройзензон Г.В. Многокритериальный выбор вычислительных кластеров // Методы поддержки принятия решений. Труды Института системного анализа РАН. / Под ред. С.В. Емельянова, А.Б. Петровского. Т. 12. – М.: Едиториал УРСС, 2005, С. 68–94.
 18. Ройзензон Г.В. Способы снижения размерности признакового пространства для описания сложных систем в задачах принятия решений // Новости искусственного интеллекта, 2005, № 1, С. 18–28.
 19. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993.
 20. Фуремс Е.М. Модифицированный метод экспертной номинально-порядковой классификации // Искусственный интеллект и принятие решений, 2010, №4, С. 81-93.
 21. Doumpos M., Zopounidis C. Multicriteria Decision Aid Classification Methods. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
 22. Greco S., Matarazzo B., Slowinski R. Rough sets methodology for sorting problems in presence of multiple attributes and criteria. // European Journal of Operational Research, 2002, Vol.138, N2, P.247-259.
 23. Hwang C.L., Lin M.J. Group Decision Making under Multiple Criteria. – Berlin: Springer-Verlag, 1987.
 24. Köksalan M., Ulu C. An interactive approach for placing alternatives in preference classes. // European Journal of Operational Research, 2003, Vol.144, N2, P.429-439.
 25. Petrovsky A.B. Multi-attribute classification of credit cardholders: multiset approach. // International Journal of Management and Decision Making, 2006, Vol. 7, N 2/3, p.166-179.
 26. Roubens M. Ordinal multiattribute sorting and ordering in the presence of interacting points of view. // Bouyssou D., Jacquet-Lagrèze E., Perny P., Slowinski R., Vanderpooten D., Vincke P. (eds.) Aiding Decisions with Multiple Criteria: Essays in Honor of Bernard Roy. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, P.229-246.
 27. Roy B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
 28. Roy B., Bouyssou D. Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et Cas. – Paris: Economica, 1993.
 29. Vincke P. Multicriteria Decision Aid. – Chichester: Wiley, 1992.

Петровский Алексей Борисович. Заведующий лабораторией Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН). Окончил Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова в 1967 г. Доктор технических наук, профессор. Автор более 140 научных работ, в том числе 3 монографий и одного учебника. Области научных интересов: дискретная математика, теория множеств, системный анализ, многокритериальный анализ решений, системы поддержки принятия решений, информационные технологии, научно-техническая политика, прогнозирование, планирование и организация научных исследований.

Ройзензон Григорий Владимирович. Старший научный сотрудник Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН). Окончил Московскую государственную академию приборостроения и информатики в 1997 г. Кандидат технических наук. Автор более 40 научных работ. Области научных интересов: многокритериальное принятие решений, искусственный интеллект, когнитивная психология.