

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ НАУЧНЫХ ПРОЕКТОВ

Алексей Петровский, Григорий Ройзензон, Игорь Тихонов

Аннотация: Изложен подход к агрегированию признаков и построению интегральных показателей оценки, основанный на интерактивном методе порядковой классификации многокритериальных альтернатив с последовательным снижением размерности признакового пространства. Представлен пример применения подхода для многокритериальной оценки результативности научных проектов.

Ключевые слова: вербальный анализ решений, многокритериальная порядковая классификация, снижение размерности признакового пространства, стратификация кортежей, агрегирование признаков, интегральные показатели оценки, результативность научных проектов

Conference: The paper is selected from XVth International Conference "Knowledge-Dialogue-Solution" KDS 2009, Varna, Bulgaria, June-July 2009

Введение

Непосредственная классификация или сравнение альтернатив, описываемых большим числом признаков, и в особенности качественных (вербальных) признаков, является трудоемкой процедурой, которая требует значительных временных затрат лица, принимающего решение (ЛПР), и нередко существенно затрудняет применение на практике известных методов принятия решений [Ларичев, 2006]. Кроме того, когда сравниваемых объектов мало (3-5), а их признаки различны по значениям и многочисленны (десятки и сотни), такие объекты, как правило, оказываются формально несравнимыми по своим свойствам. Эти обстоятельства диктуют необходимость разработки специальных методов обработки информации, обеспечивающих решение задач многокритериального выбора и классификации в пространствах большой размерности [Айвазян и др., 1989], [Глотов, Павельев, 1984], [Петровский, Ройзензон, 2008а,б].

В настоящей работе представлены интерактивный метод последовательного снижения размерности признакового пространства и результаты его использования для разработки интегральных показателей оценки результативности научных проектов, выполняемых в интересах Федеральных агентств и ведомств России по грантам Российского фонда фундаментальных исследований. Результативность научных проектов может рассматриваться как с позиций непосредственного применения полученных результатов на практике, так и для целевого формирования исследовательских программ. Построение интегрального показателя результативности научного проекта сведено к задаче многокритериальной порядковой классификации альтернатив по иерархической системе критериев. В качестве многопризнаковых объектов выступают комбинации исходных экспертных оценок проектов по принятым в Фонде критериям, градации интегрального показателя результативности играют роль классов решений. Применение процедуры иерархического агрегирования многокритериальных экспертных оценок проектов позволяет значительно снизить размерность исходного признакового пространства, что существенно сокращает время, затраченное ЛПР, для достижения поставленной цели. Предложенный подход к формированию интегральных показателей облегчает анализ и обоснование выбора окончательного варианта решения.

Снижение размерности признакового пространства

Формальная постановка задачи снижения размерности признакового пространства имеет следующий вид:

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

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 $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^p\}$, $i=1, \dots, m$, $Y_j = \{y_j^1, \dots, y_j^h\}$, $j=1, \dots, n$ с упорядоченной градацией оценок.

Рассмотрим 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.

Назовем *составным критерием* интегральный показатель, который определяет выбранное ЛПР свойство вариантов, агрегирующее исходные характеристики. Каждая градация шкалы составного критерия является комбинацией оценок исходных показателей.

Процедура агрегирования показателей является многоуровневой иерархической структурой со «слабыми» связями, в которой элемент нижележащего уровня (оценки исходных показателей) подчинен двум и более вершинам вышестоящего уровня (оценкам составных критериев). Переходя шаг за шагом на более высокий уровень иерархии, ЛПР может сконструировать приемлемые для него составные критерии вплоть до одного единственного.

Представим процедуру 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 $X_1, \dots, X_m$ всех возможных комбинаций градаций оценок на шкалах критериев $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^p\}$, $i=1, \dots, m$, и находятся границы классов, что позволяет легко построить классификацию реальных альтернатив (вариантов) $V_1, \dots, V_p$, оцененных по многим критериям $K_1, \dots, K_m$.

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. Идея метода стратификации кортежей основана на сечении многомерного дискретного признакового пространства параллельными гиперплоскостями. Каждый слой (страта) состоит из однотипных комбинаций оценок на шкалах критериев X_i , а число таких сечений (оценок) определяется ЛПР из содержательных соображений. Максимально

возможное число слоев можно рассчитать по формуле $L=1-m+\sum_{i=1}^m g_i$. Каждый слой образуется как комбинация кортежей оценок, сумма которых фиксирована. Число классов $q \leq L$. Более сложные процедуры построения шкал критериев предполагают применение методов вербального анализа решений ЗАПРОС и ОРКЛАСС [Ларичев, 2006], в которых рассматривается множество всех возможных кортежей оценок в признаковом пространстве, образованном декартовым произведением значений оценок на шкалах критериев. В этих случаях число возможных комбинаций оценок (альтернатив) равно $p = \prod_{i=1}^m g_i$.

Рассмотрим небольшой пример. Пусть ЛПР необходимо построить шкалу составного критерия D , имеющую три вербальные порядковые градации $\{d^0, d^1, d^2\}$. Шкала составного критерия образуется из шкал оценок базовых показателей, каждая из которых также имеет три вербальные порядковые градации: $A=\{a^0, a^1, a^2\}$, $B=\{b^0, b^1, b^2\}$ и $C=\{c^0, c^1, c^2\}$. Например, x^0 – отлично, x^1 – хорошо, x^2 – плохо.

Применяя для построения порядковой шкалы составного критерия метод стратификации кортежей, ЛПР может объединить исходные оценки в обобщенную оценку, например, по принципу: все лучшие оценки по базовым показателям образуют одну лучшую оценку по составному критерию, все средние оценки – средние оценки, все худшие оценки – одну худшую оценку (рис. 1).



Рис. 1. Конструирование шкалы составного критерия с помощью метода стратификации кортежей.

Воспользовавшись методом ЗАПРОС, ЛПР может сконструировать единую порядковую шкалу составного критерия, формируя ее из оценок по отдельным исходным показателям (рис. 2).



Рис. 2. Конструирование шкалы составного критерия методом ЗАПРОС.

С помощью метода ОРКЛАСС строится полная непротиворечивая порядковая классификация многопризнаковых объектов, в качестве которых в рассматриваемом случае выступают наборы оценок по исходным показателям, образующим составной критерий (рис. 3).

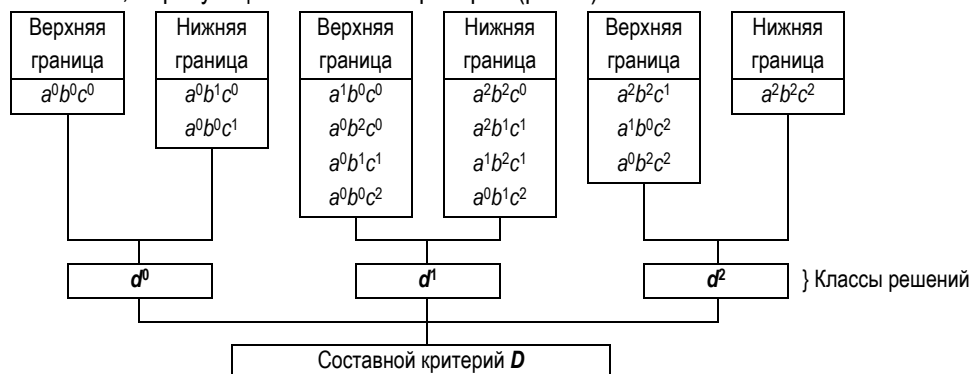


Рис. 3. Конструирование шкалы составного критерия методом ОРКЛАСС.

Предложенный новый методологический подход к снижению размерности пространства качественных признаков обладает определенной универсальностью, так как в общем случае можно оперировать как символьной (качественной), так числовой информацией.

Интерактивный метод снижения размерности признакового пространства

Схема решения задачи многокритериального выбора с использованием снижения размерности признакового пространства включает два этапа [Петровский, Ройзензон, 2008a]. На первом этапе проводится снижение размерности признакового пространства путем построения иерархической системы составных критериев. На втором этапе выполняется окончательное решение задачи выбора с использованием построенных составных (агрегированных) критериев.

Агрегирование признаков основано на предпочтениях ЛПР. Первоначально при участии ЛПР формируется базовый набор характеристик рассматриваемых объектов. В зависимости от специфики задачи эти характеристики могут быть либо заданы заранее, либо сформированы в процессе анализа проблемы. Для каждого базового показателя формируется шкала, которая может иметь числовые (точные, интервальные) или вербальные оценки. Шкалы оценок базовых показателей могут совпадать с обычно используемыми на практике, либо конструироваться специально.

Далее, исходя из опыта и интуиции ЛПР, базовые характеристики объединяются в критерии, обладающие вербальными порядковыми шкалами с небольшим числом градаций (3-5). ЛПР, по своему усмотрению, определяет число, состав и содержание критериев каждого уровня иерархии. В качестве критерия можно выбрать один из базовых показателей или несколько показателей, объединенных в составной критерий. ЛПР устанавливает, какие базовые показатели будут считаться самостоятельными критериями, а какие будут отнесены к тому или иному составному критерию. Смысловое содержание критериев и шкал оценок задается ЛПР. Критерии должны иметь такие шкалы оценок, которые, с одной стороны, будут отражать агрегированные качества объектов, а с другой стороны, будут понятны ЛПР при окончательном выборе наиболее предпочтительных объектов или их классификации.

Процедура агрегирования показателей имеет последовательный характер, т.е. полученные группы критериев могут быть, в свою очередь, объединены в новые группы (следующий уровень иерархии) и так далее. При конструировании шкал составных критериев на разных этапах могут использоваться различные способы. Например, один из составных критериев можно сформировать при помощи метода стратификации кортежей, а другой – методом многокритериальной порядковой классификации.

В зависимости от специфики задачи выбора иерархическая система критериев может быть известна заранее (например, перечень показателей организационной структуры предприятия), известна частично (например, характеристики сложной технической системы) и неизвестна вообще, т.е. иерархию требуется разработать «с нуля» (например, критерии оценки научных исследований, где присутствует высокая степень неопределенности и риска, связанная с получением нового знания). При построении системы критериев в первом случае основное внимание должно быть уделено определению 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 некоторой смысловой общности). Это позволяет сравнить полученные результаты для разных вариантов классификации и выбора с целью оценки качества решения исходной проблемы.

Интерактивный метод ИСКРА (Иерархическая Структуризация КРитериев и Атрибутов) предназначен для снижения размерности признакового пространства. Различные комбинации признаков разного уровня

иерархии рассматриваются в методе как многопризнаковые объекты, последовательно агрегируемые в составные критерии на основе предпочтений ЛПР. Метод включает в себя следующие шаги:

1. Выбор типа задачи T . Возможны следующие задачи: T_1 – выделить наилучшие альтернативы; T_2 – упорядочить альтернативы; T_3 – разделить альтернативы на упорядоченные группы (классы).
2. Формирование множества альтернатив V в зависимости от типа задачи T . Очевидно, что если необходимо проранжировать или выбрать наилучшую альтернативу, то для T_1 и T_2 $|V| \geq 2$.
3. Формирование множества базовых показателей (исходных признаков) X : $X_1, \dots, X_m$. $|X| = m \geq 2$. В зависимости от специфики задачи эти характеристики могут быть либо заданы заранее, либо сформированы при исследовании проблемы с помощью аналитика-консультанта или эксперта.
4. Формирование порядковых шкал $X_i = \{x_i^1, \dots, x_i^g\}$, $i = 1, \dots, m$, базовых показателей в зависимости от типа задачи T . Для задач ранжирования или выбора наилучшей альтернативы необходимо рассматривать только те оценки базовых показателей, которые встречаются в описании альтернатив V , т.е. для T_1 и T_2 $g \leq |V|$. Тем самым 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 $K_1, \dots, K_m$.
5. Формирование множества составных критериев, т.е. интегральных показателей, которые определяют выбранное ЛПР свойство вариантов, агрегирующее базовые характеристики: Y : $Y_1, \dots, Y_n$. ($n < m$).
6. Формирование порядковых шкал $Y_j = \{y_j^1, \dots, y_j^{h_j}\}$, $j = 1, \dots, n$ составных критериев. Каждая градация шкалы составного критерия является комбинацией оценок базовых показателей.
7. Выбор способа W построения шкал составных критериев (агрегирования показателей) $X_1 \times \dots \times X_m \rightarrow Y_1 \times \dots \times Y_n$, $n < m$. Возможны следующие способы: W_1 – стратификация кортежей; W_2 – ранжирование кортежей; W_3 – многокритериальная порядковая классификация кортежей. Для разных составных критериев можно использовать различные способы построения шкал.
8. Если получен удовлетворительный результат решения задачи T (по составным критериям построена порядковая классификация альтернатив; получено упорядочение альтернатив; выделены наилучшие альтернативы), то алгоритм завершает работу, иначе переход к шагу 9.
9. Если на шаге 8 получен неудовлетворительный результат, 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).

Важной особенностью предложенного подхода к снижению размерности признакового пространства является возможность его использования в сочетании с другими методами принятия решений и обработки информации, позволяя представить каждую градацию шкалы составного критерия в виде комбинации оценок базовых показателей.

Многокритериальная оценка результативности научных проектов

Существует достаточно много практических задач, в которых необходима разработка интегральных показателей деятельности. Типичным примером является оценка результативности научных проектов. Значительный опыт в организации и проведении экспертизы фундаментальных исследований и полученных результатов, представляющих интерес с точки зрения их практического применения,

накоплен в Российском фонде фундаментальных исследований (РФФИ). Для оценки возможностей эффективного практического использования научных результатов было формализовано понятие «результативность научного проекта» применительно к фундаментальным исследованиям, выполняемым в интересах Федеральных агентств и ведомств России по грантам РФФИ.

Построение интегрального показателя результативности научного проекта рассмотрена как задача многокритериальной порядковой классификации по иерархической системе критериев с использованием снижения размерности признакового пространства [Петровский, Ройзензон, 2008а]. Классифицируемыми объектами являлись комбинации многокритериальных экспертных оценок отчетов по законченным проектам, классами решений служили градации интегрального показателя результативности. ЛПР имело возможность формировать понятие «результативность научного проекта» различным образом и сравнивать полученные интегральные показатели.

Каждый отчет оценивался несколькими экспертами по восьми критериям (базовым признакам) $K_1, \dots, K_8$, имеющими шкалы X_i с двумя или тремя вербальными порядковыми оценками 0, 1, 2, где 0 обозначает лучшую оценку, 1 – среднюю (или худшую), 2 – худшую. Например, критерий K_1 характеризовал «Степень выполнения заявленных задач», которая может оцениваться как 0 – задачи выполнены полностью, 1 – задачи выполнены частично, 2 – задачи не выполнены. Критерий K_3 оценивал «Достижение поставленной цели в установленные сроки» как 0 – реальное, 1 – нереальное. Составным критерием верхнего уровня являлась «Результативность научного проекта», градации оценок по шкале которого (высокая, хорошая, средняя, низкая, неудовлетворительная) определяли 5 упорядоченных классов решений $D_1, \dots, D_5$.

Модельная база данных включала экспертные оценки отчетов по проектам фундаментальных исследований РФФИ, завершенным в 2007 году. Для экспериментальной проверки работы алгоритмов и построения интегральных показателей результативности были взяты отчеты по следующим областям знаний: 01. Математика, механика и информатика (всего 48 отчетов); 03. Химия (всего 54 отчета); 07. Информационные, вычислительные, телекоммуникационные ресурсы (всего 21 отчет).

Интегральные показатели результативности проектов определялись по каждой области знания и для каждого эксперта с помощью различных сочетаний методов принятия решений, а именно: методом ОРКЛАСС (ОР); методом стратификации кортежей (СК); сначала (на нижнем уровне иерархии) методом стратификации кортежей, потом (на верхнем уровне иерархии) методом ОРКЛАСС (СК+ОР); сначала (на нижнем уровне иерархии) методом ОРКЛАСС, потом (на верхнем уровне иерархии) методом стратификации кортежей (ОР+СК). Пример оценки результативности проектов, полученных разными методами по оценкам двух экспертов, приведен на рис. 4.

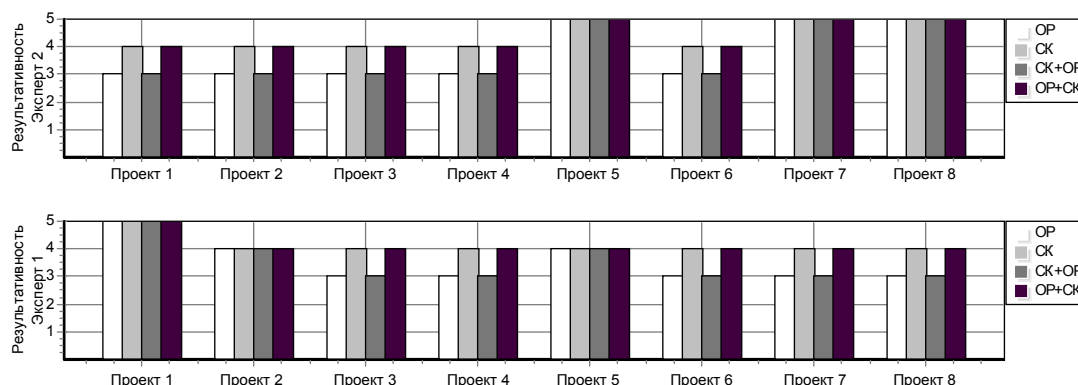


Рис. 4. Пример распределения альтернатив по классам решений.

Распределение проектов по классам результативности, полученное для четырех вышеперечисленных методов формирования шкал составных критериев, представлено в таблице 1. Первое число – число

проектов с оценками первого эксперта, второе число – число проектов с оценками второго эксперта. Значение интегрального показателя результативности совпадало у каждого из экспертов в следующем числе случаев: по области 01 (48 проектов) – для 34/23 проектов, по области 03 (54 проекта) – для 39/13 проектов, по области 07 (21 проект) – для 16/13 проектов, что также свидетельствует о достаточно высокой устойчивости результата относительно исходных данных и способа построения шкал составных критериев на всех уровнях иерархии.

Таблица 1. Распределение проектов по классам результативности

Область знания	Показатель результативности	Метод ОР	Метод СК	Метод СК+ОР	Метод ОР+СК
01. Математика, механика и информатика	Наивысший (5)	16/8	16/7	16/7	16/8
	Высокий (4)	15/14	28/34	14/15	28/35
	Средний (3)	17/26	4/4	18/25	4/4
	Низкий (2)	0/0	0/3	0/1	0/1
03. Химия	Наивысший (5)	4/3	4/3	4/2	4/2
	Высокий (4)	39/17	42/47	27/11	42/47
	Средний (3)	17/33	5/3	20/40	5/4
	Низкий (2)+(1)	3/1	3/2	3/1	3/1
07. Информационные, вычислительные, телекоммуникационные ресурсы	Наивысший (5)	6/4	6/4	6/4	6/4
	Высокий (4)	6/9	10/16	6/8	10/16
	Средний (3)	9/8	4/1	9/9	5/1
	Низкий (2)	0/0	1/0	0/0	0/0

Было также рассмотрено два варианта построения иерархической системы критериев: с агрегированием базовых оценок по критериям $K_1, \dots, K_8$ соответственно в два и три промежуточных критерия. Анализ распределения проектов для области 03 по показателю результативности исходя из их экспертных оценок показал следующее: наивысший показатель результативности получили по 1 варианту иерархической системы критериев 16 проектов, а по 2 варианту – 6; высокий показатель результативности – 75 и 40 проектов; средний показатель результативности – 13 и 59 проектов, низкий показатель результативности – 2 и 1 проекта, неудовлетворительный показатель результативности – 2 и 2 проекта.

Таким образом, 1 вариант агрегирования оценок по критериям (с выделением двух промежуточных критериев) дает более высокий интегральный показатель результативности, чем 2 вариант (с выделением трех промежуточных критериев). В целом по двум вариантам интегральные показатели результативности совпадают в 41 случае из 108 (54 проекта оценивались двумя экспертами). В остальных случаях интегральные показатели результативности отличались не более чем на одну градацию, что может рассматриваться как свидетельство достаточно высокой устойчивости результата относительно исходных данных и выбранных способов построения шкал составных критериев на всех уровнях иерархии.

Заключение

Использование метода ИСКРА при решении задач многокритериального выбора и классификации дает ЛПР возможность сравнить полученные решения для разных наборов составных критериев, сформированных с помощью различных способов. Оценкой эффективности выбранного способа решения задачи может служить число обращений к ЛПР, необходимых для построения полной непротиворечивой классификации для каждого набора составных критериев. Альтернативной оценкой эффективности

является сравнение распределений альтернатив по классам решений для одного и того же набора составных критериев, сформированных различным образом.

При решении конкретной прикладной задачи предложенный подход позволяет выбрать как наиболее предпочтительный набор составных критериев, так и метод или совокупность методов их построения. Последовательное разделение всех критериев на отдельные группы дает возможность «распараллелить» решение задачи, что обеспечивает ощутимую экономию трудозатрат. Применение процедуры иерархического агрегирования базовых показателей позволяет значительно снизить размерность исходного признакового пространства, что существенно сокращает время, затраченное ЛПР, для достижения поставленной цели.

Благодарности

Статья частично финансирована из проекта **ITHEA XXI** Института Информационных теории и Приложений FOI ITHEA и Консорциума FOI Bulgaria (www.ithea.org, www.foibg.com).

Список литературы

- [Айвазян и др., 1989] 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.
- [Глотов, Павельев, 1984] Глотов В.А., Павельев В.В. Векторная стратификация. — М.: Наука, 1984.
- [Ларичев, 2006] Ларичев О.И. Вербальный анализ решений / Под ред. А.Б.Петровского. — М.: Наука, 2006.
- [Петровский, Ройзензон, 2008а] Петровский А.Б., Ройзензон Г.В. Снижение размерности признакового пространства в задачах многокритериальной классификации // Decision Making and Business Intelligence Strategies and Techniques / Ed. by K. Markov, K. Ivanova, I. Mitov. — No. 3. — Sofia: FOI ITHEA, 2008. — Pp. 81–86.
- [Петровский, Ройзензон, 2008б] 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. — М.: Едиториал УРСС, 2008. — Т. 35. — С. 43–53.

Сведения об авторах

Петровский Алексей Борисович – д.т.н., заведующий лабораторией Института системного анализа РАН, Россия, Москва 117312, пр-т 60-летия Октября, 9, тел. (495)135-8503, e-mail: pab@isa.ru

Ройзензон Григорий Владимирович – к.т.н., научный сотрудник Института системного анализа РАН, Россия, Москва 117312, пр-т 60-летия Октября, 9, тел. (495)135-8503, e-mail: rgv@isa.ru

Тихонов Игорь Петрович – к.т.н., начальник отдела целевых фундаментальных исследований Российского фонда фундаментальных исследований, Россия, Москва 117334, Ленинский пр-кт, 32А, e-mail: tikhonov@rfbr.ru