

Моделирование характеристик деятельности отраслевых и региональных подсистем

Матрицеподобные вычисления при обработке недоопределенных знаний в продукционных системах (на примере задачи выбора технологии обогащения минерального сырья)*

А. А. Зуенко, О. В. Фридман

Аннотация. В работе исследована возможность описания факторов неопределенности (НЕ-факторов) на основе матричного представления конечных предикатов без использования неклассических логик. Предложен метод, обеспечивающий решение задачи уточнения значений недоопределенных параметров в системах продукции и реализующий концепцию программирования в ограничениях. Приводится пример вывода на ограничениях для задачи выбора технологии обогащения и назначения минерального сырья.

Ключевые слова: *недоопределенные модели, вывод на ограничениях, алгебра кортежей, матричное представление конечных предикатов, продукционные системы.*

Введение

Известно, что для описания факторов неопределенности (НЕ-факторы) могут быть использованы различные формы: стохастическая, статистическая, интервальная, нечеткая [10]. Интервальное представление факторов неопределенности отвечает наиболее широкому классу задач, поскольку во многих прикладных задачах часто недостаточно информа-

ции для того, чтобы рассматривать факторы как случайные. Ситуация, когда некоторые параметры представлены как интервалы, типична для моделирования многих сложных объектов, например промышленно-природных систем, где измерения сопряжены с погрешностью, которую требуется учитывать в дальнейших расчетах, в том числе в расчетах искомых значений непосредственно неизмеримых величин. Существенная роль в формализации подобных систем принадлежит экспертным суждениям и знаниям человека.

При исследовании слабо формализованных предметных областей зависимости и ограничения носят прежде всего качественный, а не количественный

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № № 12-07-00550-а, 12-07-00689-а, 13-07-00318-а, 14-07-00205-а, 14-07-00256-а, 14-07-00257-а; Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 16), ОНИТ РАН (проект 2.3 в рамках текущей Программы фундаментальных научных исследований).

характер и могут быть описаны средствами математической логики. Для вещественной рациональной функции n вещественных переменных легко строится естественное интервальное расширение: все вещественные переменные заменяются соответствующими интервальными, а вещественные арифметические операции — интервально-арифметическими. Интервальная арифметика обладает монотонностью по включению, т. е. в процессе вычислений значение может становиться только более точным, гарантируя монотонность вывода. Однако если модель включает качественные нечисловые параметры, а начальные данные могут задаваться приблизительно, например в виде множеств значений, то требуются новые методы, аналогичные известным методам последовательных приближений.

По мнению авторов, разработку таких методов целесообразно вести в рамках парадигмы программирования в ограничениях (Constraints Programming) [9, 13, 17], чтобы облегчить интеграцию создаваемых методов с известными интервальными моделями.

В статье представлено применение разработанных ранее одним из авторов методов вывода на ограничениях [1–3] к организации процедур логического вывода в системах, основанных на правилах. Описываемые методы ориентированы на обработку недоопределенных параметров, с каждым из которых сопоставляется не одно конкретное значение, а некоторое подмножество из множества допустимых значений. Значение параметра может быть полностью не определено и задаваться в виде всего домена, полностью определено — представлять одноэлементное подмножество домена, недоопределено — задаваться в виде некоторого подмножества домена. Используется интервальная форма для описания факторов неопределенности, если считать множество своеобразным интервалом. Сам вывод состоит в последовательном «сжатии» изначально заданных диапазонов значений данных и конкретизации значений интересующих параметров на основе анализа совокупности ограничений (правил).

Наиболее близким к предлагаемому в статье подходу является подход, развиваемый в теории недоопределенных моделей [7]. Метод недоопределенных моделей (Н-моделей) был предложен А. С. Нариньяни для представления и обработки не полностью определенных знаний. Однако в работах А. С. Нариньяни не уделено должного внимания логическим моделям, предложенный им потоковый алгоритм носит достаточно общий характер и требует уточнений в применении к логическим уравнениям, к виду которых могут быть сведены экспертные правила.

Для представления качественных зависимостей (продукций), а также для решения задачи уточнения

значений недоопределенных нечисловых параметров предлагается применять аппарат алгебры кортежей (АК) [5]. Далее описываются упомянутые выше методы вывода на ограничениях на основе матричного представления конечных предикатов.

1. Распространение ограничений на основе анализа матриц конечных предикатов

В [5, 16] приводятся основы АК и демонстрируется ее применение для унификации представления и обработки различных видов данных и знаний, а также решения различных задач логического и логико-вероятностного анализа. Близкий подход применяется также в [18] для решения задач распознавания образов и упрощения баз знаний.

Многие виды данных и знаний, используемые в интеллектуальных системах, в том числе и системы продукций, могут быть выражены на языке конечных предикатов.

Конечные предикаты в АК можно сжато представить с помощью двух типов структур: C -систем и D -систем. Конкретные экземпляры этих структур называются АК-объектами.

С помощью C -систем удобно записывать дизъюнктивные нормальные формы (ДНФ) конечных предикатов. Продемонстрируем это на примере. Пусть задан конечный предикат:

$$\varphi(x, y, z) = (x = a, b) \wedge (y = a, c) \vee (z = d).$$

Для простоты все переменные определены на одном и том же множестве $\{a, b, c, d\}$. Здесь и далее будем использовать запись вида $(x = a, b)$ для обозначения выражения $(x = a) \vee (x = b)$. Учитывая, что область истинности одноместного предиката $(x = a, b)$ есть $\{a, b\}$, то область истинности предиката $\varphi(x, y, z)$ может быть представлена в виде следующей C -системы:

$$R[XYZ] = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{a, c\} & * \\ * & * & \{d\} \end{bmatrix}.$$

Атрибуты X, Y, Z C -системы $R[XYZ]$ соответствуют переменным x, y, z формулы $\varphi(x, y, z)$. Здесь и далее условимся обозначать атрибуты заглавными (прописными) латинскими буквами, а переменные в предикатах — строчными латинскими буквами. Заметим, что «*» — сокращенное обозначение всего диапазона возможных значений (домена)

атрибута. C -систему $R[XYZ]$ можно преобразовать в многоместное отношение следующим образом:

$$(\{a, b\} \times \{a, c\} \times \{a, b, c, d\}) \cup (\{a, b, c, d\} \times \{a, b, c, d\} \times \{d\}).$$

АК-объекты можно рассматривать как недоопределенные расширения обычных отношений, поскольку их кортежи содержат в качестве значений множества, а не отдельные элементы. Здесь напрашивается аналогия с интервальным анализом [15]. В частности, многоместное отношение можно соотнести с матрицей чисел, а АК-объект с интервальной матрицей, где компонентами являются интервалы.

С помощью D -систем моделируются конъюнктивные нормальные формы (КНФ) конечных предикатов. D -система записывается как матрица компонент-множеств, которая ограничена перевернутыми прямыми скобками.

D -системы позволяют легко вычислять дополнение C -систем: берется дополнение для каждой компоненты-множества. Например, предикат $\neg\varphi = \neg(x = a, b) \vee \neg(y = a, c) \wedge \neg(z = d)$, что равносильно $\neg\varphi = ((x = c, d) \vee (y = b, d)) \wedge (z = a, b, c)$, может быть выражен как D -система $\overline{R}[XYZ]$:

$$\overline{R}[XYZ] = \left[\begin{array}{ccc} \{c, d\} & \{b, d\} & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \{a, b, c\} \end{array} \right]$$

Пустая компонента « \emptyset » — это фиктивная компонента, не содержащая значений.

На основе матричного представления конечных предикатов были разработаны новые методы решения задач удовлетворения ограничений (Constraint Satisfaction Problem — CSP), которые позволяют обойтись без разложения ограничений в бинарные отношения [3]. Анализ внутренней структуры таких матриц обеспечивает эффективную редукцию пространства поиска. Впервые в АК была рассмотрена инкрементная постановка задачи поиска и разработан метод распространения ограничений, основанный на пошаговом усечении доменов атрибутов и получении решения задачи CSP в виде совокупности доменов. В отличие от имевшихся в АК (и других прототипах) методов «слепого» поиска, в разработанных методах нашли широкое применение эвристики.

Далее в кратком изложении приводятся упомянутые методы решения задач CSP, описываются используемые эвристики и применяемые правила редукции пространства поиска.

Согласно [17] задача удовлетворения ограничений определена множеством переменных $x_1, x_2, \dots,$

x_n и множеством ограничений C_1, C_2, \dots, C_m . Каждая переменная x_i имеет непустую область определения D_i (область возможных значений, домен). Каждое ограничение C_i включает некоторое подмножество переменных и задает допустимые комбинации значений для этого подмножества. Состояние задачи описывается как присваивание значений некоторым (частичное присваивание) или всем переменным (полное присваивание): $\{x_i = v_i, x_j = v_j, \dots\}$. Присваивание, не нарушающее никаких ограничений, называется допустимым присваиванием. Решением задачи CSP является полное присваивание, которое удовлетворяет всем ограничениям.

При решении задач CSP дерево поиска можно представить как дерево частичных присваиваний — это дерево, где каждая вершина соответствует некоторому частичному присваиванию. Корень дерева отвечает пустому присваиванию. В вершине v выбирается лишь одна переменная, которой еще не было присвоено значение на предыдущих уровнях дерева поиска.

Среди методов поиска в глубину, используемых при решении CSP, можно выделить те методы, где переменные при конструировании частичного присваивания просматриваются в некотором заранее выбранном порядке. Однако, такое статическое упорядочение переменных редко приводит к эффективному поиску [13]. Следовательно, выбор переменной и присваиваемого ей значения должен осуществляться динамически на каждом шаге поиска, для чего применяются различного рода эвристики. Методы, использующие эвристики, называются методами информированного или эвристического поиска. Эти методы позволяют отложить исследование менее перспективных ветвей дерева поиска, отдав предпочтение более перспективным с точки зрения получения скорейшего решения.

Для выбора «наилучшего» преемника текущей вершины дерева поиска необходимо указать переменную, которой на текущем шаге следует присвоить значение, а также само присваиваемое значение, которое быстрее всего приводит к цели.

Пусть ограничения задачи моделируются в виде некоторой D -системы. В предлагаемом методе выбор «наилучшего» преемника производится на основе следующих эвристик:

Э1. Выбирается атрибут D -системы с доменом, содержащим наименьшее количество значений, что позволяет проверять меньшее количество преемников;

Э2. В случае неоднозначности выбора, производимого согласно Э1, выбирается атрибут, количество непустых компонент которого максимально;

Э3. Для формирования нового одноэлементного домена выбирается наиболее часто встречающееся в кортежах D -системы значение атрибута.

Само присваивание заключается в «настройке» D -системы на новый одноэлементный домен выбранного на текущем шаге атрибута с последующим упрощением D -системы и переходу к рассмотрению D -системы меньшей размерности, чем текущая.

Состояние задачи в терминах введенных матрицеподобных структур полностью характеризуется с помощью совокупности доменов атрибутов, которые уже элиминированы из D -системы и самой D -системы, представляющей собой остаток, полученный из исходной D -системы в ходе присваиваний и применения правил редукции, которые представлены ниже утверждениями **У1-У6**. Если не все вершины дерева поиска являются тупиковыми, то решение записывается в виде совокупности доменов.

Помимо применения эвристик, позволяющих более эффективно организовать «разбор случаев», можно существенно ускорить процесс поиска при решении задач CSP, рассматривая внутреннюю структуру текущего состояния задачи. Зачастую, пространство поиска может быть значительно редуцировано вообще без организации «ветвления» с помощью алгоритмов, преобразующих описание текущего состояния в эквивалентное ему более простое описание. Такие алгоритмы имеют полиномиальную оценку сложности.

Далее уточним некоторые особенности поиска на основе матричного представления конечных предикатов, а именно:

1. Каков признак того, что текущая ветвь поиска является тупиковой (соответствующее этой вершине текущее присваивание недопустимо)?
2. Как уменьшить размерность пространства поиска, не прибегая к ветвлению?
3. Что служит признаком успешного завершения процесса поиска?

Для ответа на эти вопросы рассмотрим следующие утверждения, приводимые здесь без доказательств:

Утверждение 1 (У1). Если хотя бы одна строка D -системы пуста (содержит все пустые компоненты), то D -система пуста (соответствующая ей КНФ невыполнима);

Утверждение 2 (У2). Если все компоненты некоторого атрибута пусты, то данный атрибут можно удалить из D -системы (удаляются все компоненты стоящие в соответствующем столбце);

Утверждение 3 (У3). Если в D -системе есть строка (кортеж), содержащая лишь одну непустую

компоненту, то все значения, не входящие в эту компоненту, удаляются из соответствующего домена (компонента становится новым доменом данного атрибута);

Утверждение 4 (У4). Если строка D -системы содержит хотя бы одну полную компоненту, то она удаляется (можно удалить соответствующий дизъюнкт из КНФ);

Утверждение 5 (У5). Если компонента некоторого атрибута D -системы содержит значение, не принадлежащее соответствующему домену, то это значение удаляется из компоненты;

Утверждение 6 (У6). Если одна строка D -системы полностью доминирует (покомпонентно содержит) другую строку, то доминирующая строка удаляется из D -системы.

Ответ на первый из поставленных вопросов дает нам **У1**, то есть *признаком недопустимости* частичного присваивания является пустота D -системы.

Ответом на второй вопрос служат остальные утверждения, часть из которых позволяет исключать значения из доменов атрибутов (**У3**, **У5**) или даже сами атрибуты (**У2**), а часть позволяет исключать из рассмотрения лишние строки (**У4**, **У6**).

Признак успешного завершения процесса поиска — вычеркивание из D -системы *всех* строк и столбцов без образования пустых строк. Другими словами, результирующее состояние в этом случае будет характеризоваться только совокупностью непустых усеченных доменов.

Описанные в настоящей статье методы предназначены для систематического исследования пространства поиска на основе анализа дерева частичных присваиваний, то есть гарантированно позволяют либо получить решение, либо установить, что его не существует. Систематичность достигается из-за того, что производится регистрация ранее исследованных альтернатив. После обнаружения тупиковой вершины осуществляется возврат к некоторой точке ветвления, расположенной выше в дереве поиска. При этом используется *механизм обратного перехода, управляемого конфликтами* (conflict-directed backjumping). Каждому атрибуту X_i сопоставляется вектор L_i , размерность которого равна мощности домена соответствующего атрибута. Вектор L_i служит для представления *конфликтного множества атрибутов* для заданного атрибута X_i . Конфликтное множество атрибута X_i есть множество атрибутов с ранее присвоенными значениями, которые связаны с X_i ограничениями. Заметим, что программно домен представляется в виде упорядоченного списка элементов. Изначально вектор L_i заполнен нулями. При исключении в результате применения правил редукции k -ого значения из домена атрибута

X_i в k -ой компоненте вектора L_i запоминается индекс атрибута, который явился причиной элиминации этого значения. Если исключение производится из-за присваивания некоторого значения атрибуту X_i , то в заполненные нулями компоненты вектора L_i вносится значение i . Пустота домена атрибута X_i , то есть обнаружение конфликта (тупиковой вершины), распознается как отсутствие в векторе L_i значений, отличных от нуля и от i . Возврат производится к атрибуту, чей индекс был последним внесен в конфликтное множество (вектор L_i).

Таким образом, весь процесс поиска можно представить как последовательность шагов:

1. Упрощение описания состояния задачи (редукция D -системы) путем циклического применения утверждений У2-У6 с возможным пополнением частичного решения новыми элементами;
2. Проверка недопустимости частичного решения и реализация режима возврата, в случае необходимости. Если получено решение или исследованы все альтернативы, то п. 5;
3. Выбор очередного атрибута, согласно Э1 и Э2;
4. Выбор по Э3 значения атрибута, добавление нового элемента в частичное решение и переход к п. 1;
5. Конец.

Можно дать следующие рекомендации по порядку применения на первом шаге правил редукции: а) проверить У2; б) применить последовательно У5, У4, У3; в) применить У6.

Теперь перейдем непосредственно к рассмотрению возможностей применения представленных методов удовлетворения ограничений в задаче логического вывода на правилах, содержащих недоопределенные параметры.

2. Возможности применения методов удовлетворения ограничений при построении производственной системы

Системы представления знаний, использующие выражения вида «ЕСЛИ условие, ТО действие», получили название систем продукций или систем, основанных на правилах [6, 12]. Рассмотрим, один из наиболее распространенных случаев, когда производственная система относится к классу систем с четко определенными знаниями, а база фактов аддитивна, т. е. в процессе вывода факты добавляются и в дальнейшем не удаляются [8]. Подсистема вывода реализует процесс рассуждений на основе базы знаний и базы фактов. Получение в ходе вывода факта о новом значении уже имеющегося в базе фактов

данного трактуется как конфликт, то есть различные значения каждого данного рассматриваются как взаимоисключающие.

В начале экспертизы все заданные значения данных (как параметров — данных символьного типа, так и переменных — данных числового типа) считаются возможными. По мере срабатывания правил из списка возможных значений в базе данных исключаются те значения данных, которые противоречат частям ТО или ИНАЧЕ сработавших правил. Запись в базу фактов производится только тогда, когда список возможных значений сужается до единственного значения. Противоречие в данных фиксируется в двух случаях: либо при появлении фактов «за» значение данного, уже исключенного из списка допустимых, либо если на некоторой итерации в списке новых фактов появляются свидетельства как за истинность, так и за ложность предпосылки какого-либо правила.

Очевидно, что если знания не определены, подход к выводу будет иметь особенности, а иногда и довольно сильно отличаться от приведенной схемы, поскольку появление в базе фактов различных значений одного и того же данного будет уже трактоваться как неопределенность, а не как противоречие. В этом случае, даже при наличии аддитивной базы фактов, добавление фактов происходит не только когда область определения данного сужается до единственного значения. Считается, что для работы с неопределенностью следует привлекать неклассические логики [12]. Далее на примерах продемонстрирован подход, позволяющий осуществлять подобную работу с недоопределенными данными в производственных системах в рамках классической логики.

Пример. В работе [4] приведено описание реализованной на компьютере экспертной системы, предназначенной для принятия решений на уровне командира корабля в случае возникновения нештатных ситуаций на корабле или в окружающей обстановке, в частности, в боевых условиях.

Рассмотрим комплект правил по анализу электрообеспечения корабля. В этом комплекте используются 4 фактора. Данные по ним и соответствующие обозначения приведены в табл. 1. Пусть поступила информация: «Основные источники вышли из строя в одном эшелоне, канализация энергии или не нарушена, или нарушена частично», где данное «Канализация энергии» задано неоднозначно.

Правило 1: IF (($x = c$) AND ($y = b$)) OR ($z = b$) THEN ($w = c$);

Правило 2: IF ($x = b$) THEN ($w = b$);

Исходные данные: ($x = b$) AND (($z = a$) OR ($z = b$)).

Таблица 1

Факторы неопределенности

Наименования факторов и их значения	Обозначения факторов	Обозначения значений факторов
СНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ	W	
обеспечено полностью		a
утрачено частично		b
утрачено полностью		c
ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ	X	
в строю		a
вышли из строя в одном эшелоне		b
вышли из строя в обоих эшелонах		c
АВАРИЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ	Y	
в строю		a
вышли из строя		b
КАНАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	Z	
не нарушена		a
нарушена частично		b
нарушена полностью		c

Решение:

Представленные правила можно записать на языке математической логики:

Правило 1: $((x = c) \wedge (y = b)) \rightarrow (w = c);$

$(z = b) \rightarrow (w = c);$

Правило 2: $(x = b) \rightarrow (w = b);$

Исходные данные: $(x = b) \wedge ((z = a) \vee (z = b)).$

Для того, чтобы подчеркнуть аналогию с методами решения систем линейных уравнений, используя технику распространения констант (например, методом Гаусса) и методами на основе Н-моделей, запишем правила и исходные данные в виде системы логических уравнений с дополнительными ограничениями:

$$\begin{cases} ((x = a, b) \vee (y = a) \vee (w = c)) = 1, \\ ((z = a, c) \vee (w = c)) = 1, \\ ((x = a, c) \vee (w = b)) = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Дополнительные условия: $x = b; z = a, b$ (2).

Теперь перейдем к записи системы (1) и дополнительных условий (2) в матрицеподобных структурах. Так система правил моделируется в виде D -системы A , а конъюнктивная база фактов в виде кор-

тежа B :

$$A[XYZW] = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{a\} & \emptyset & \{c\} \\ \emptyset & \emptyset & \{a, c\} & \{c\} \\ \{a, c\} & \emptyset & \emptyset & \{b\} \end{bmatrix}$$

$$B[XYZW] = [\{b\} * \{a, b\} *].$$

Каждая строка D -системы A соответствует некоторому уравнению из системы (1).

Из записи $B[XYZW]$ видно, что значение переменной X — определено, Y и W — полностью не определено, а переменной Z — недоопределено.

В терминологии теории экспертных систем $B[XYZW]$ есть некоторый образец, в соответствии с которым требуется осуществлять поиск.

Рассмотрим, каким образом решается задача уточнения недоопределенных параметров для уравнения, моделируемого D -системой $A[XYZW]$ при дополнительных ограничениях, задаваемых в виде C -системы $B[XYZW]$, которая может быть преобразована в обычное отношение по формуле:

$$B[XYZW] = \{b\} \times \{a, b\} \times \{a, b\} \times \{a, b, c\}.$$

Фактически, $B[XYZW]$ задает подпространство (брус), где следует искать решение, в пространстве с осями $X = \{a, b, c\}$, $Y = \{a, b\}$, $Z = \{a, b, c\}$, $W = \{a, b, c\}$.

Начнем вывод с «настройки» D -системы $A[XYZW]$ на новые домены, которые содержатся в компонентах $B[XYZW]$, то есть положим $X = \{b\}$, $Y = \{a, b\}$, $Z = \{a, b\}$, $W = \{a, b, c\}$:

Частичное решение: на начальном этапе не содержит ни одного элемента.

Остаток D -системы:

	X	Y	Z	W
	$\{b\}$	$\{a, b\}$	$\{a, b\}$	$\{a, b, c\}$
1	[$\{a, b\}$	$\{a\}$	\emptyset
2]	\emptyset	\emptyset	$\{a, c\}$
3]	$\{a, c\}$	\emptyset	\emptyset
				$\{c\}$

По **У5** удаляем значение «а» из компонент первой и третьей строки. После чего удаляем строку № 1 по **У4**. Тогда по **У2** можно исключить из D -системы атрибуты X и Y , добавив их домены в частичное решение. Рассматривая атрибут Z , можно, руководствуясь **У5**, удалить значение «с» из компоненты строки № 2. Получим:

Частичное решение: $X = \{b\}$, $Y = \{a, b\}$.

Остаток D -системы:

	Z	W
	$\{a, b\}$	$\{a, b, c\}$
2	[$\{a\}$
3]	\emptyset
		$\{c\}$
		$\{b\}$

Строка № 3 содержит лишь одну непустую компоненту, а, значит, домен атрибута W (целевое данное) может быть сужен до $\{b\}$. Следовательно, из компонент атрибута W вычеркиваем значения, не принадлежащие $\{b\}$:

Частичное решение: $X = \{b\}$, $Y = \{a, b\}$, $W = \{b\}$.

Остаток D -системы:

	Z	W
	$\{a, b\}$	$\{b\}$
2	[$\{a\}$
3]	\emptyset
		*

Откуда несложно заключить, что для Z домен сузится до $\{a\}$.

Окончательное решение: $X = \{b\}$, $Y = \{a, b\}$, $Z = \{a\}$, $W = \{b\}$.

Таким образом, в результате применения подстановки, моделируемой кортежем $B[XYZW] = [\{b\} * \{a, b\} *]$, получаем, что значение целевого данного (атрибут W) — «b» (снабжение электроэнергией утрачено частично). Однако, после нахождения значения целевого данного процедура поиска не заканчивается, а еще уточняется значение «а» данного Z (канализация энергии не нарушена). При этом не только устанавливается значение целевого данного W , но и конкретизируется значение Z . Домены этих параметров существенно сузились: X , Z , W стали полностью определенными, лишь значение Y осталось полностью неопределенным. Следовательно, в базе фактов для Y будут одновременно присутствовать два различных значения.

Ниже приводится еще один пример, иллюстрирующий предлагаемый механизм вывода на правилах. Рассматривается система продукций, предназначенная для выбора технологии переработки минерального сырья на различных этапах процесса обогащения флогопитовых руд.

3. Вывод на правилах при выборе технологии обогащения и назначения минерального сырья

Вовлекаемое в переработку минеральное сырье отличается сложным вещественным составом и низким содержанием полезных компонентов, что требует новых подходов для выделения полезных компонентов с проведением анализа используемой технологии и отдельным рассмотрением каждой стадии обогащения.

Обогащение — это методы переработки природного минерального сырья, которое представляет собой естественную смесь ценных компонентов и пустой породы, с целью получения концентратов, содержащих существенно большее количество ценных компонентов. Обогащение руды осуществляется преимущественно механическими, а также термическими и химическими методами.

Процессы переработки полезных ископаемых разделяют на подготовительные, основные (обогащительные) и вспомогательные (заклочительные) [11].

Технологический процесс, описанный в данной статье, состоит из нескольких шагов, в результате которых достигается отделение полезных компонентов от примесей:

1. Измельчение (дробление), с последующим определением характеристик полученного измельченного материала (начальный выход полезного компонента и др.);

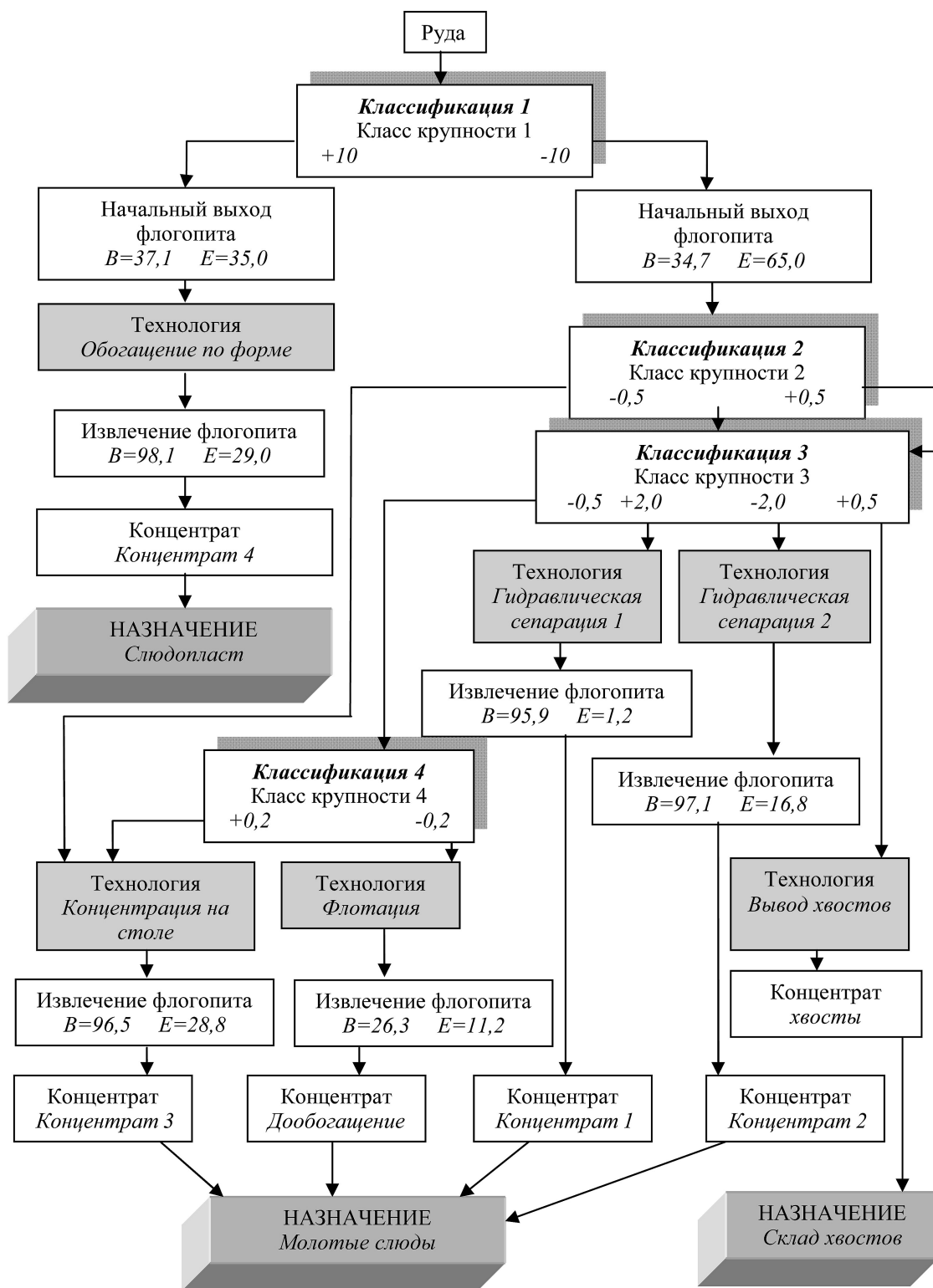


Рис. 1. Упрощенная схема технологического процесса переработки и обогащения флогопитовых руд

2. Классификация, в процессе которой происходит разделение материала по крупности в жидкости (или газе), основанное на различии скоростей падения зерен различной крупности в полях гравитационной силы (гравитационная классификация) или центробежной силы (центробежная классификация). Измельчение и классификация относятся к подготовительным процессам, которые предназначены для раскрытия или открытия зерен полезных компонентов (минералов), входящих в состав полезного ископаемого, и деления его на классы крупности, удовлетворяющие технологическим требованиям последующих этапов обогащения;
3. Выбор технологии дальнейшей обработки (обогащение по форме, гидравлическая сепарация, концентрация на столе, флотация, вывод хвостов) и определение характеристик полученного материала после ее проведения (процент извлечения полезного компонента и др.). Используемые на этом этапе процессы относятся к основным (обогатительным) и предназначены для разделения исходного минерального сырья с раскрытыми или открытыми зернами полезного компонента на соответствующие продукты. В процессах обогащения используют отличия минералов полезного компонента и пустой породы в плотности, крупности, форме зерен, химических свойствах и др. В результате основных процессов полезные компоненты выделяют в виде концентратов, а породные минералы удаляют в виде отходов, которые направляют в отвал (хвосты). Кроме того, в процессе обогащения могут быть получены промежуточные продукты, предназначенные для дальнейшей переработки, которая относится к вспомогательным (заклужительным) процессам;
4. Определение назначения обогащенного сырья. Назначение полученного обогащенного сырья в рамках описываемого примера — это слюдопласт, молотые слюды и складирование хвостов. Слюдопласт — это электроизоляционный (гибкий в холодном состоянии до первого нагрева и жесткий) материал, состоящий из нескольких слоев слюдобумаги, пропитанных и склеенных связующим веществом под давлением при определенной температуре. Основные области применения молотой слюды — производство композитных и лакокрасочных материалов. Молотые слюды сухого помола используются в основном при производстве электродов и органосиликатных материалов, а также в небольших объемах для специального назначения.

Склад хвостов — это склад для хранения отходов (хвостов), которые непригодны для дальнейшей переработки [11].

Выбор наиболее эффективной технологии обогащения конкретного вида минерального сырья может осуществляться путем разработки комплексных логико-аналитических моделей процессов его переработки. В работе [14] описана информационная технология поддержки решения задач организации и управления процессами обогащения минерального сырья. В рамках этой технологии создана экспертная система по выбору технологии переработки и назначения обогащаемого материала. Далее приведен фрагмент набора правил базы знаний, которые участвуют в экспертном выводе при выборе в качестве исходного сырья флогопитовых руд.

На рис. 1 представлена упрощенная схема технологического процесса переработки и обогащения флогопитовых руд.

В табл. 2 описаны данные, участвующие в экспертном выводе. Поясним некоторые имена и значения данных в табл. 2.

Данные Круп_флог_М представляют класс крупности исходного сырья флогопитовых руд. Значения этих данных говорят о размере зерен руды, поступающих на переработку. Знак минус означает, что размер зерен меньше указанного числового значения в миллиметрах (например 10), а знак плюс — что размер зерен больше указанного числового значения в миллиметрах.

Данное Извл_флог — извлечение флогопита из руды, данное Нач_выход_флог — начальный выход флогопита после первичного этапа переработки. Значения этих данных характеризуют состав извлеченного полезного компонента, где В — содержание ценного компонента в некоторой фракции (%), Е — извлечение ценного компонента (%).

Данное Пром_обр_флог — тип промышленной обработки флогопита, Технология_флог — используемая технология обработки флогопита.

Данное Назначение определяет дальнейшее использование полученных материалов. В рассматриваемом примере это слюдопласт, молотые слюды и склад хвостов.

Теперь представим фрагмент набора правил из базы знаний, которые участвуют в экспертном выводе при выборе в качестве исходного сырья флогопитовых руд.

Соответствия «переменная — ее домен» выглядят следующим образом: $x_1 — \{a, b, c\}$; $x_2 — \{d, e\}$; $x_3 — \{f, g\}$; $x_4 — \{h, i, j, k\}$; $x_5 — \{l, m\}$; $x_6 — \{n, o, p, r, s\}$; $x_7 — \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$; $x_8 — \{t, u\}$; $x_9 — \{v, w\}$; $x_{10} — \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$.

Данные и их значения

Тип данного	Имя данного и имя переменной	Значения переменных и их обозначения
Целевое	Назначение (x_1)	молотые_слябды (a), слябдопласт (b), склад_хвостов (c)
Листевое	Круп_флог_1 (x_2)	+10 (d); -10 (e)
	Круп_флог_2 (x_3)	+0,5(f); -0,5(g)
	Круп_флог_3 (x_4)	+0,5(h); +2,0(i); -2,0(j); -0,5(k)
	Круп_флог_4 (x_5)	+0,2(l); -0,2 (m)
Промежуточное	Извл_флог (x_6)	V=98,1 E=29,0 (n); V=95,9 E=1,2 (o); V=97,1 E=16,8 (p); V=96,5 E=28,8 (r); V=26,3 E=11,2 (s)
	Концентрат (x_7)	концентрат_1 (1), концентрат_2 (2), концентрат_3 (3), концентрат_4 (4), дообогащение (5), хвосты (6)
	Нач_выход_флог (x_8)	V=37,1 E=35,0 (t); V=34,7 E=65,0 (u)
	Пром_обр_флог (x_9)	классификация_3 (v), классификация_4 (w)
	Технология_флог (x_{10})	обогащение_по_форме (7); гидравлическая_сепарация 1 (8); гидравлическая_сепарация 2 (9); концентрация_на_столе (10), флотация (11); вывод_хвостов (12)

Правила:

1. ЕСЛИ $x_2 = d$, ТО $x_8 = t$;
2. ЕСЛИ $x_2 = e$, ТО $x_8 = u$;
3. ЕСЛИ $x_8 = t$, ТО $x_{10} = 7$;
4. ЕСЛИ $x_8 = u$ И $x_3 = f$, ТО $x_9 = v$;
5. ЕСЛИ $x_8 = u$ И $x_3 = g$, ТО $x_9 = w$;
6. ЕСЛИ $x_9 = v$ И $x_4 = h$, ТО $x_{10} = 12$;
7. ЕСЛИ $x_9 = v$ И $x_4 = i$, ТО $x_{10} = 8$;
8. ЕСЛИ $x_9 = v$ И $x_4 = j$, ТО $x_{10} = 9$;
9. ЕСЛИ $x_9 = v$ И $x_4 = k$, ТО $x_{10} = 10$;
10. ЕСЛИ $x_9 = w$ И $x_5 = l$, ТО $x_{10} = 10$;
11. ЕСЛИ $x_9 = w$ И $x_5 = m$, ТО $x_{10} = 11$;
12. ЕСЛИ $x_{10} = 7$, ТО $x_6 = n$;
13. ЕСЛИ $x_{10} = 8$, ТО $x_6 = o$;
14. ЕСЛИ $x_{10} = 9$, ТО $x_6 = p$;
15. ЕСЛИ $x_{10} = 10$, ТО $x_6 = r$;
16. ЕСЛИ $x_{10} = 11$, ТО $x_6 = s$;
17. ЕСЛИ $x_{10} = 12$, ТО $x_7 = 6$;
18. ЕСЛИ $x_6 = n$, ТО $x_7 = 4$;
19. ЕСЛИ $x_6 = o$, ТО $x_7 = 1$;
20. ЕСЛИ $x_6 = p$, ТО $x_7 = 2$;
21. ЕСЛИ $x_6 = r$, ТО $x_7 = 3$;
22. ЕСЛИ $x_6 = s$, ТО $x_7 = 5$;
23. ЕСЛИ ($x_7 = 1$) ИЛИ ($x_7 = 2$) ИЛИ ($x_7 = 3$) ИЛИ ($x_7 = 5$), ТО $x_1 = a$;
24. ЕСЛИ $x_7 = 4$, ТО $x_1 = b$;
25. ЕСЛИ $x_7 = 6$, ТО $x_1 = c$.

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
	$\{a,b,c\}$	$\{d,e\}$	$\{f,g\}$	$\{h,i,j,k\}$	$\{l,m\}$	$\{n,o,p,r,s\}$	$\{1,2,3,4,5,6\}$	$\{t,u\}$	$\{v,w\}$	$\{7,8,9,10,11,12\}$
1	\emptyset	$\{e\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{t\}$	\emptyset	\emptyset
2	\emptyset	$\{d\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{u\}$	\emptyset	\emptyset
3	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{u\}$	\emptyset	$\{7\}$
4	\emptyset	\emptyset	$\{g\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{t\}$	$\{v\}$	\emptyset
5	\emptyset	\emptyset	$\{f\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{t\}$	$\{w\}$	\emptyset
6	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{i,j,k\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{w\}$	$\{12\}$
7	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{h,j,k\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{w\}$	$\{8\}$
8	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{h,i,k\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{w\}$	$\{9\}$
9	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{h,i,j\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{v\}$	$\{10\}$
10	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{m\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{v\}$	$\{10\}$
11	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{l\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{v\}$	$\{11\}$
12	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{n\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{8,9,10,11,12\}$
13	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{o\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{7,9,10,11,12\}$
14	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{p\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{7,8,10,11,12\}$
15	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{r\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{7,8,9,11,12\}$
16	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{s\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{7,8,9,11,12\}$
17	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{6\}$	\emptyset	\emptyset	$\{7,8,9,10,11\}$
18	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{o,p,r,s\}$	$\{4\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
19	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{n,p,r,s\}$	$\{1\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
20	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{n,o,r,s\}$	$\{2\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
21	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{n,o,p,s\}$	$\{3\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
22	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{n,o,p,r\}$	$\{5\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
23	$\{a\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{4,6\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
24	$\{b\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{1,2,3,5,6\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
25	$\{c\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{1,2,3,4,5\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset

Выше правила записаны в виде *D*-системы, где атрибуты X_i соответствуют переменным x_i .

Допустим, требуется по листовым данным $x_2 = d$ и $x_4 = h, k$ определить значение целевого данного x_1 (Назначение). То есть, необходимо найти назначение исходного сырья с крупностью зерен более 10 мм, с последующим измельчением до крупности зерен более или менее 5 мм. Этот запрос можно выразить в виде *C*-системы $Q[X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9X_{10}] = [* \{d\} * \{h, k\} * * * * *]$, где атрибут X_2 полностью определен, атрибут X_4 недоопределен, а все остальные данные не определены.

Тогда результат этого запроса к базе знаний, выраженной в виде представленной выше *D*-системы, вычисляется путем редукции этой *D*-системы с учетом бруса дополнительных ограничений Q . Применяя описанные выше правила редукции, на очередной итерации получим:

Частичное решение:

$X_1 - \{b\}, X_2 - \{d\}, X_3 - \{f, g\}, X_6 - \{n\}, X_7 - \{4\}, X_8 - \{t\}, X_{10} - \{7\}$.

Остаток *D*-системы:

	X_4	X_5	X_9
	$\{h, k\}$	$\{l, m\}$	$\{v, w\}$
6	$\{k\}$	\emptyset	$\{w\}$
9	$\{h\}$	\emptyset	$\{v\}$
10	\emptyset	$\{m\}$	$\{v\}$
11	\emptyset	$\{l\}$	$\{v\}$

Далее правила редукции использовать не представляется возможными, и для продолжения процесса поиска привлекаются эвристики. Видно, что эвристика Э1 не позволяет выбрать атрибут (переменную). Применение Э2 дает возможность выбрать атрибут X_9 . Опираясь на Э3, ищем наиболее часто встречаемое значение в столбце — это « v ». Далее производим «настройку» *D*-системы, на новый одноэлементный домен и получаем решение: $X_1 - \{b\}, X_2 - \{d\}, X_3 - \{f, g\}, X_4 - \{k\}, X_5 - \{l, m\}, X_6 - \{n\}, X_7 - \{4\}, X_8 - \{t\}, X_9 - \{v\}, X_{10} - \{7\}$.

Более того, других результатов на данный запрос не может быть выдано. Действительно, если в точке ветвления для атрибута X_9 было бы выбрано значение « w », а не « v », то получили бы противоречие (тупиковая вершина дерева поиска), то есть в D -системе была бы обнаружена строка, состоящая лишь из пустых компонент.

Заметим, что процесс поиска не остановился при получении значения целевого данного, а продолжился до тех пор, пока не были вычеркнуты все строки и столбцы D -системы.

Таким образом, на запрос «определить назначение исходного сырья (переменная x_1) с крупностью зерен более 10 мм (переменная x_2 с входным значением d), с последующим измельчением до крупности зерен более или менее 0,5 мм (переменная x_4 с входными значениями h или k)» получен ответ: назначение исходного сырья — слюдопласт (переменная x_1 приняла значение b). Кроме уточнения значений промежуточных переменных, последовательно получаемых при движении по прямой цепочке вывода, предлагаемый метод позволяет также конкретизировать значение входной переменной x_4 (крупность зерен менее 0,5 мм, значение k).

4. Заключение

В работе исследована возможность описания факторов неопределенности (НЕ-факторов) на основе матричного представления конечных предикатов без использования вероятностного или нечеткого подходов и т. п. Разработан метод, обеспечивающий без нарушения законов классической логики решение задачи уточнения значений недоопределенных параметров в системах продукции. В отличие от механизма вывода в традиционных системах продукции с полностью определенными данными, в предлагаемом методе в базу фактов могут добавляться сразу несколько значений одного и того же данного, причем это трактуется не как противоречие, а как неопределенность. Метод позволяет выявлять некорректности (прежде всего, пустоту домена некоторого параметра) в процессе логического вывода путем пошагового усечения диапазонов возможных значений параметров.

Литература

1. Зуенко А. А. Матрицеподобные вычисления в задачах удовлетворения ограничений / А. А. Зуенко // Шестая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (30 сентября – 5 октября 2013 г.). Материалы мультиконференции: в 4 т., Ростов н/Д: Издательство Южного федерального университета, 2013. Т. 1. С. 30–34.
2. Зуенко А. А. Матричное представление конечных предикатов для автоматизации логико-семантического анализа / Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2014): мат. IV Междунар. научн.-техн. конф., г. Минск, 20–22 февраля 2014 г. Минск: БГУИР, 2014. С. 251–256.
3. Зуенко А. А. Решение задач удовлетворения ограничений с применением матричного представления конечных предикатов / Искусственный интеллект и принятие решений, 2014. (в печати)
4. Индейцев А. И. Система интеллектуальной поддержки борьбы за живучесть надводного корабля / А. И. Индейцев, А. Г. Сергеев // Методы и средства информационной поддержки борьбы за живучесть надводных кораблей. СПб.: ИПМаш РАН. 1995. С. 15–35.
5. Кулик Б. А. Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний. / Б. А. Кулик, А. А. Зуенко, А. Я. Фридман. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010, 235 с.
6. Лорвер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта: Пер. с франц. М.: Мир, 1991. 568 с.
7. Нариньяни А. С. Недоопределенное календарное планирование: новые возможности. / А. С. Нариньяни, Д. А. Иванов, С. В. Седреев, С. А. Фролов. // «Информационные технологии», № 1, М., 1997.
8. Нильсон Н. Искусственный интеллект. Методы поиска решений. М.: Мир, 1973.
9. Оситов Г. С. Методы искусственного интеллекта. М.: Физматлит, 2011. 296 с.
10. Петровский А. Б. Теория принятия решений. М.: Издательский центр «Академия», 2009.
11. Польшкин С. И. Обогащение руд цветных металлов. / С. И. Польшкин, Э. В. Адамов. М., 1983.
12. Представление и использование знаний: Пер. с япон. / Под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. М.: Мир, 1989. С. 29–47.
13. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход. / С. Рассел, П. Норви 2-е изд. / пер. с англ.; ред. К. А. Птицына. М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. 1408 с.
14. Фридман О. В. Информационная технология поддержки решения задач организации и управления процессами обогащения минерального сырья // Информационные ресурсы России, № 3 (91), 2006. С. 35–37.
15. Шарый С. П. Конечномерный интервальный анализ. М.: 2007.
16. Kulik B., Fridman A., Zuenko A. Logical Inference and Defeasible Reasoning in N-tuple Algebra. In: «Diagnostic Test Approaches to Machine Learning and Commonsense Reasoning Systems», IGI Global, P 102–128.
17. Ruttkay Zs. Constraint satisfaction a survey // CWI Quarterly. 1998. V. 11, P. 163–214.
18. Zakrevskij A. Integrated Model of Inductive-Deductive Inference Based on Finite Predicates and Implicative Regularities. In: «Diagnostic Test Approaches to Machine Learning and Commonsense Reasoning Systems», IGI Global, P. 1–12.

Зуенко Александр Анатольевич. Н. с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки ИИММ КНЦ РАН. К. т. н. Окончил в 2005 г. Петрозаводский ГУ. Количество печатных работ: 90. Область научных интересов: системы моделирования на основе открытой концептуальной модели предметной области, искусственный интеллект, представление и обработка знаний. E-mail: zuenko@iimm.ru

Фридман Ольга Владимировна. С. н. с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки ИИММ КНЦ РАН. К. т. н. Окончила в 1984 г. Петрозаводский ГУ. Количество печатных работ: 145. Область научных интересов: прикладные интеллектуализированные системы, экспертные системы, нейронные сети. E-mail: ofridman@iimm.ru