

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ (Вычислительные системы)

2002 год

Выпуск 171

УДК 519.95

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБРАЗЦОВ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА¹

Ю.А.Анохин, И.А.Борисова, Н.Г.Загоруйко

В в е д е н и е

В настоящее время на территории России эксплуатируются около 30 энергоблоков установленной электрической мощностью 22,24 ГВт. В их числе 14 энергоблоков с реакторами типа ВВЭР, 11 энергоблоков с реакторами типа РБМК, 4 энергоблока типа ЭГП Библибинской АТЭЦ с канальными водографитовыми реакторами и один энергоблок на быстрых нейтронах БН-600. Россия имеет уникальный опыт эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах — БН-350 и БН-600 (безаварийная работа в течение 20 лет). Продолжается эксплуатация в режиме энергообеспечения канальных уран-графитовых промышленных реакторов в г.Северске (Сибирская АЭС) и г.Железногорске. Кроме этого, на станции высокой степени достройки находятся 4 энергоблока: на Ростовской, Калининской, Балаковской АЭС с ВВЭР-1000 и на Курской АЭС с РБМК-1000.

Для осуществления идеи замкнутого ядерного топливного цикла на Урале в 1976 году на комбинате "Маяк" был построен специальный радиохимический завод, предназначенный для переработки отработавшего ядерного топлива (на рис.1 и 2 — ОЯТ) реакторов ВВЭР-440, исследовательских ядерных реакторов и ядерных реакторов подводных лодок.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 02-01-00082.

Существующая на данный момент концепция замкнутого по урану ядерного топливного цикла России представлена на рис.1. Плутоний же, получаемый в результате переработки отработанного топлива различных реакторов, складировается в виде диоксида в специальном хранилище завода, и его использование до последнего времени не предполагалось. В настоящее время на этом складе находится около 32 тонн плутония энергетического качества. Хранение осуществляется в специальных контейнерах, в каждом из которых масса материала по соображениям ядерной безопасности не превышает нескольких килограмм.

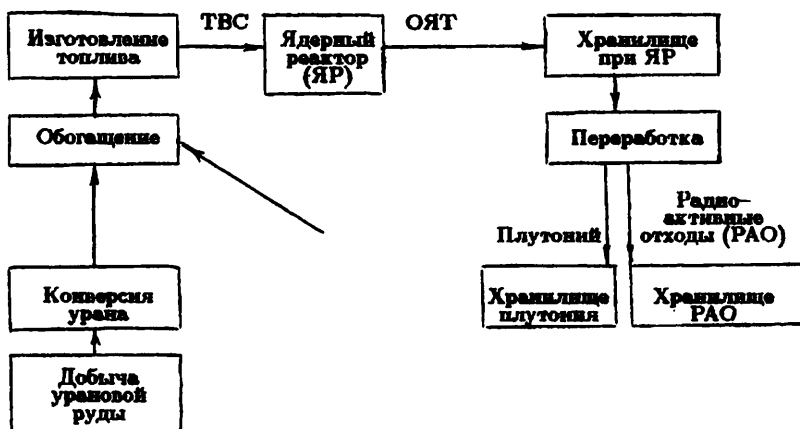


Рис. 1

В сентябре 1997 года Министр атомной энергетики России В.Н.Михайлов по поручению Президента России сделал заявление, что с точки зрения целей национальной обороны России считает избыточным "до 50 тонн оружейного плутония". Примерно такое же количество избыточного оружейного плутония было объявлено и Правительством США.

Известно мнение представителей Минатома России о том, что подавляющая часть избыточного российского плутония должна быть использована как топливо MOX (MOX — смесь диоксида

урана и плутония). Кроме оружейного предполагается привлечение в атомную энергетику и энергетического плутония, хранящегося на складе. Возможность использования плутония в качестве топлива для АЭС позволит осуществить замыкание топливного цикла и по плутонию (см. рис.2).

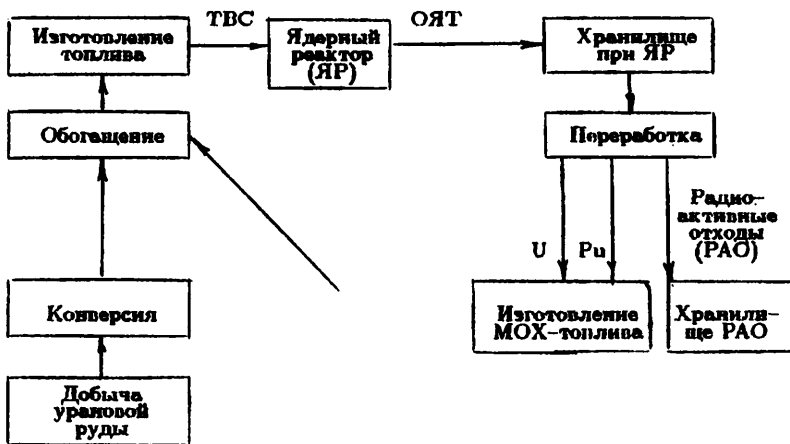


Рис. 2

Энергетический плутоний поступал на хранение в продолжение ~ 30 лет. В течение этого времени происходило и совершенствование конструкций, технологических и других параметров АЭС, происходило и совершенствование технологии переработки отработавшего ядерного топлива. Таким образом, состав материала, находящегося на хранении, отличается по своим параметрам не только из-за изменения технологии, но и за счет "старения" материала, вызванного радиоактивным распадом элементов, входящих в его состав.

Одним из условий использования MOX-топлива на АЭС, является однородность состава партий топлива, загружаемого в активную зону реактора. В связи с этим возникает задача группировки контейнеров, содержащих материалы с приблизительно одинаковым изотопным составом. Задачи такого рода решаются методами автоматической классификации (таксономии [1]).

1. Предварительная обработка экспериментальных данных

Экспериментальные данные содержат описание изотопного состава контейнеров, заложенных в хранилище отработанного ядерного топлива в разные годы. Данные представлены табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Контейнер	И з о т о п				
	A	B	C	D	E
1	0,00052	0,866	0,115	0,0159	0,0018
2	0,00062	0,860	0,115	0,0223	0,0018
3	0,00070	0,857	0,116	0,0245	0,0017
4	0,00060	0,862	0,119	0,0183	0,0020
5	0,00052	0,866	0,116	0,0159	0,0018
6	0,00062	0,860	0,115	0,0223	0,0018

В строках указаны процентные содержания соответствующих изотопов плутония.

Всего исходные данные содержали несколько десятков тысяч строк. Часть строк имела номер контейнера и дату его выпуска, но не содержала данных об изотопных составах. Такие строки были исключены из анализа. Некоторые из строк таблицы содержали ошибки. В большинстве случаев наличие одной ошибки в строке таблицы можно обнаружить по простому правилу: сумма чисел в строке должна равняться единице. Если же ошибками поражены несколько элементов строки, то это правило может не сработать. В этих случаях для обнаружения и исправления ошибки применялась программа ZET в режиме редактирования. (Описание программы ZET содержится в [1,2].)

Исходные данные фиксировали состав контейнеров в момент их передачи на хранение. За время, прошедшее с тех пор, составы контейнеров из-за радиоактивного распада элементов претерпели изменения. В связи с этим, расчетным путем был определен состав, который будут иметь все контейнеры в 2003 году. Эти данные и были использованы при обработке экспериментального материала методами таксономии.

2. Методы таксономии

Содержательную постановку задачи таксономии можно прочитать в работе, написанной еще во II в. до нашей эры. В "Письме ученому соседу" Демокрит пишет такие слова: "Если тебе дорогой друг, нужно разобраться в сложном нагромождении фактов или вещей, ты сначала разложи их на небольшое число куч по похожести. Картина прояснится, и ты поймешь природу этих вещей".

Группировка объектов (часто употребляют также термины "автоматическая классификация", "самообучение", "кластеризация" и пр.) по похожести их свойств упрощает решение многих практических задач анализа данных. Так, если объекты описаны свойствами, которые влияют на общую оценку их качества, то в группу (таксон) будут собраны объекты, обладающие приблизительно одинаковым качеством. И вместо того, чтобы хранить в памяти все объекты, достаточно сохранить описание типичного представителя каждого таксона ("эталона", "прецедента"), перечислить номера объектов, входящих в данный таксон, и указать максимальное отклонение каждого свойства от его среднего значения для данного таксона.

Самый известный критерий качества таксономии F состоит в том, что в один таксон должны собираться объекты похожие, близкие по своим характеристикам. Но термины "похожесть", "близость" можно понимать по-разному. Остановимся на разновидности меры "похожести" в виде "похожести на центр".

Если координаты центра j -го таксона обозначить символом C_j , то сумма расстояний $\rho(C_j, a_i)$ между центром и всеми m_j точками a_i этого таксона будет равна $\rho_j = \sum \rho(C_j, a_i)$, где $i = 1 \dots m_j$, а сумма таких внутренних расстояний для всех k таксонов равна $F = \sum \rho_j$, $j = 1 \dots k$.

Смысл критерия похожести на центр состоит в том, что нужно найти такое разбиение m объектов на k таксонов, чтобы приведенная выше величина F была минимальной. Выполнение этого условия можно достичь с помощью алгоритма FOREL [1]. Таксоны, получаемые этим алгоритмом, имеют сферическую форму. Количество таксонов зависит от радиуса сфер: чем меньше радиус, тем больше будет получаться таксонов. Вначале

строится гиперсфера минимального радиуса R_0 , которая охватывает все m точек. Если бы нам был нужен один таксон, то он был бы представлен именно этой начальной сферой. Для получения большого числа таксонов мы постепенно уменьшаем радиус сфер. Берем радиус $R_0/1,5$ и помещаем центр сферы в любую из имеющихся точек. Находим точки, расстояние до которых меньше радиуса, и вычисляем координаты центра тяжести этих "внутренних" точек. Переносим центр сферы в этот центр тяжести и снова находим внутренние точки. Сфера, как бы плывет в сторону локального сгущения точек. Такая процедура определения внутренних точек и переноса центра сферы продолжается до тех пор, пока сфера не остановится, т.е. пока на очередном шаге мы не обнаружим, что состав внутренних точек, а следовательно и их центр тяжести, не меняется. Это значит, что сфера остановилась в области локального максимума плотности точек в признаковом пространстве.

Точки, оказавшиеся внутри остановившейся сферы, мы объявляем принадлежащими таксону номер 1 и исключаем их из дальнейшего рассмотрения. Для оставшихся точек описанная выше процедура повторяется до тех пор, пока все точки не окажутся включенными в таксоны.

Повторяя всю процедуру с меньшим радиусом, мы получим большее число таксонов. При радиусе $R = 0$ число таксонов k будет равно числу объектов m .

Можно идти и обратным путем — от малого радиуса к большому. На первом шаге выбирается наибольший радиус $R > 0$, дающий $k_1 < m$ таксонов первого уровня. На втором шаге при радиусе $R_2 = R_1 + 1,5$ происходит слияние некоторых близких друг другу мелких таксонов в более крупные таксоны, в результате чего появляются k_2 таксонов второго уровня ($k_2 < k_1$). Если эти шаги продолжать, то на некотором шаге p будет получена таксономия, объединяющая все точки в один единственный таксон.

Отношения между таксонами разных уровней можно представить себе в виде иерархической структуры или дерева, состоящего из m объектов на нулевом уровне (уровне "листьев") и k_i таксонов, $i = 1, \dots, p$, на каждом из p уровней. Корневая (p -ая)

вершина этого дерева будет содержать $k_p = 1$ таксон со всеми m объектами. Именно этот вариант программы таксономии FOREL был использован в данной работе.

3. Результаты таксономии

В табл. 2 представлен фрагмент результатов таксономии одной из частей данных.

Т а б л и ц а 2

№ шага	Дерево таксономии
16	1742
15	1595
14	1595
13	1594
12	1359
11	1124
10	1030
9	699
8	698
7	599
6	168
5	140 ←—————┐
4	99 ←—————┐ 41
3	84 ←—————┐ 10 5 23
2	42 ←┐ 9 ←┐ 33 ←┐ 10 5 23
1	28 14 5 4 4 29 10 5 16 ...

В первом слева столбце показан "основной ствол" таксономического дерева. В начале процесса первым выделился таксон из 28 объектов, второй таксон состоял из 14 объектов третий — из 5 и т.д. Всего при начальном радиусе было выделено около 200 таксонов с количеством объектов от 1 до 104.

На втором шаге к первому таксону присоединился второй таксон из 14 объектов, и они образовали таксон из 42 объектов. (Присоединение происходит справа налево.) На этом же шаге объединились между собой третий с четвертым и пятый с

шестым. Седьмой и восьмой таксоны сохранили свою самостоятельность, что говорит об их удаленности от других таксонов. На третьем шаге объединились в общий таксон таксоны с первого по шестой. На следующем шаге к ним присоединились и таксоны семь и восемь. Наконец, на последнем шестнадцатом шаге все объекты объединились в один общий таксон.

На всех уровнях иерархии программа выдает на печать состав каждого таксона, координаты его центра и разброс значений по каждой координате. Это позволяет выбрать тот наиболее высокий уровень таксономической иерархии, на котором число таксонов относительно не велико, а таксоны имеют разброс параметров, допустимых с точки зрения решаемой целевой задачи.

З а к л ю ч е н и е

Результаты классификации контейнеров оказались полезными для решения технологических задач, возникающих в процессе дальнейшего использования отработавшего ядерного топлива. Программа иерархической таксономии FOREI позволяет получать наглядное описание структуры больших массивов информации и выделяет таксоны, которые имеют простую форму и легко интерпретируются содержательно.

Л и т е р а т у р а

1. ЗАГОРУЙКО Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. — Новосибирск: Изд. ИМ СО РАН, 1999. — 270 с.
2. АНОХИН А.Ю., ЗАГОРУЙКО Н.Г., ПИЧУЕВА А.Г. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных закономерностей. — Настоящий сборник. — С. 11-21.

Поступила в редакцию
12 сентября 2002 года