

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ РЕАКЦИИ ГЛУБОКОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ

А.А. Андрианов*, Ю.А. Коровин*, И.С. Купцов*, А.Ю. Конобеев**,
О.Н. Андрианова***

*НИЯУ «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

**Институт безопасности реакторов, Исследовательский центр Карлсруэ
76131 Германия, Карлсруэ

***АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033 Россия, г. Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1

Р

Представлены результаты сравнительной оценки прогностической способности семнадцати моделей реакций глубокого расщепления (CEM02, CEM03, Phits/jam, Cascade/ASF, Phits/Bertini, Bertini/Dresner, Cascade-4, INCL4/Abla, INCL4/smm, geant4/binary, Isabela/smm, geant4/Bertini, Isabela/Abla, INCL4/Gemini, CASCADeX-1.2, Isabel/Gemini, Phits/jqmd) для реакций взаимодействия протонов высоких энергий с ядрами ^{nat}Pb с использованием наиболее популярных методов дискретного многокритериального анализа решений (MAVT/MAUT, ANP, TOPSIS, PROMETHEE). Методы многокритериального анализа решений широко применяются для поддержки принятия решений в различных предметных областях, включая ядерную физику и инжиниринг, при агрегации конфликтующих критериев с учетом мнений экспертов и лиц, принимающих решения. В качестве критериев использованы четыре наиболее часто применяемых в данной предметной области факторов расчетно-экспериментального согласия (R, D, F, H), которые, будучи агрегированными в рамках применения соответствующих методов многокритериального анализа решений, позволяют оценить интегральную меру эффективности расчетной модели и осуществить на этой основе ранжирование моделей по степени их предсказательной способности. Показано, что результаты ранжирования, полученные с использованием различных методов многокритериального анализа решений, хорошо согласованы между собой. На основе применения стохастического подхода к генерации весов выполнено ранжирование моделей в условиях отсутствия информации касательно значимости отдельных факторов согласия. Приводятся рекомендации по использованию методов многокритериального анализа решений для задач по подготовке константного обеспечения в условиях многофакторной оценки расчетно-экспериментальных расхождений.

Ключевые слова: высокоэнергетические ядерные реакции, ядерные данные, методы многокритериального анализа решений, неопределенность.

© А.А. Андрианов, Ю.А. Коровин, И.С. Купцов, А.Ю. Конобеев, О.Н. Андрианова, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач по проектированию высокоэнергетических источников нейтронов, производству медицинских радиоизотопов, защите от высокоэнергетического излучения космических аппаратов и ускорителей требуется большое число ядерных данных в широком диапазоне энергий, достигающих нескольких десятков гигаэлектронвольт. Получить все данные экспериментально невозможно, в связи с чем ведется разработка аналитических методов, точность которых проверяется путем сопоставления с данными натуральных измерений [1 – 3].

Существует большое число программ, позволяющих рассчитывать разнообразные ядерные реакции для различных типов налетающих частиц, диапазонов энергий и массовых чисел ядер-мишеней. Для количественного сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными предложены разные критерии и методы оценки. Однако как не существует единой теоретической модели, удовлетворительно описывающей весь спектр представляющих практический интерес ядерных реакций, так и нет универсальной процедуры оценки предсказательной способности расчетных инструментов, что может приводить к разным выводам касательно наиболее репрезентативной расчетной модели.

В работе приводятся результаты многокритериальной сравнительной оценки прогностической способности семнадцати моделей реакций глубокого расщепления (CEM02, CEM03, Phits/jam, Cascade/ASF, Phits/Bertini, Bertini/Dresner, Cascade-4, INCL4/Abla, INCL4/smm, geant4/binary, Isabela/smm, geant4/Bertini, Isabela/Abla, INCL4/Gemini, CASCADeX-1.2, Isabel/Gemini, Phits/jqmd) для реакций взаимодействия высокоэнергетического протона с ядром ^{nat}Pb . Для проведения многокритериального сопоставления использованы наиболее популярные методы дискретного многокритериального анализа решений (MAVT/MAUT, АНР, TOPSIS, PROMETHEE), а также стохастические методы оценки влияния неопределенностей в весовых факторах на результаты, позволяющие ранжировать модели в условиях отсутствия информации касательно значимости отдельных факторов согласия.

СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ РЕАКЦИИ ГЛУБОКОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ

Компьютерное моделирование является единственным способом, посредством которого можно описать механизм взаимодействия нуклонов в области высоких энергий, чему способствует повышение производительности вычислительной техники. Получившие широкое распространение в последнее время векторные и параллельные вычисления предоставляют широкие возможности, позволяя моделировать большое число событий, протекающих за короткий период времени. Модели, прошедшие валидацию, включаются в комплексы программ расчета переноса излучений, что позволяет рассчитать последствия взаимодействия образованных частиц с веществом. В связи с этим активно ведутся работы по стандартизации кодов и параметров, входящих в них. Обсуждаются две возможности решения данной проблемы. Первое решение состоит в подборе параметров и программных модулей для получения требуемых данных. Второе направление заключается в унификации и согласовании фундаментальных параметров. При этом существует вероятность того, что расчеты, выполненные с таким набором параметров, могут хуже согласовываться с экспериментом. Сводная информация об усовершенствованных транспортных кодах для изучения взаимодействия излучения с веществом и генераторов взаимодействия частиц с ядрами с указанием их особенностей приведены в табл. 1 [3 – 7].

Модель внутриядерного каскада, основанная на методе Монте-Карло, соединен-

ная с испарительной моделью снятия возбуждения, используемая для расчета выходов и характеристик всех частиц, образующихся в реакциях глубокого расщепления, получила широкое распространение. Иногда между двумя стадиями включают предравновесную эмиссию частиц. Описания процессов нуклон-нуклонных взаимодействий практически совпадают во всех программах. Значительные расхождения обнаруживаются в критериях выхода из стадии внутриядерного каскада, в модельном описании предравновесной стадии, процесса испускания кластеров и образования пионов.

Таблица 1

Наиболее распространенные современные транспортные коды

Транспорт Язык	Внутриядерный каскад (предравновесие)	Снятие возбуждения	Налетающая частица	Верхний энергетический предел
MCNPX2.7 MCNP6 Fortran 90	Bertini (MPM)	Dresner или ABLA	n, p π	3.5 ГэВ 2.5 ГэВ
	Isabel (MPM)		n, p π d, t, ³ He, α	0.8 ГэВ 1.0 ГэВ 1.0 ГэВ/нуклон
	INCL4.2		n, p π d, t, ³ He, α	~3 ГэВ ~2.5 ГэВ ~3 ГэВ/нуклон
	CEM03 + GEM		n, p π	5 ГэВ 2.5 ГэВ
PHITS2.64 Fortran 77	INCL4.6	GEM	n, p π d, t, ³ He, α	3 ГэВ 3 ГэВ 3 ГэВ/нуклон
GEANT4 C++	Bertini внутрияд. каскад (+предравновесие)	Встроенное испарение (или GEM), Деление, Множественная фрагментация, Модель распада Ферми или AblaV3	n, p π	10 ГэВ 10 ГэВ
	Binary каскад (+предравновесие)		n, p π d, t, ³ He, α	10 ГэВ 10 ГэВ ~3 – 5 ГэВ/нукл.
	INCL++		n, p π d, t, ³ He, α	~3 ГэВ ~3 ГэВ ~3 ГэВ /нуклон
FLUKA Fortran 77	PEANUT (GINC+предравновесие)	Встроенное испарение, Деление и	n, p π	5 ГэВ 5 ГэВ
	r-QMD-2.4	Модель распада Ферми	d, t, ³ He, α	5 ГэВ/нуклон
MARS Fortran 77	CEM03	GEM	n, p π	5 ГэВ 5 ГэВ
	LAQGSM	GEM	d, t, ³ He, α	800 ГэВ/нуклон

Энергетический диапазон, в котором применим данный комплекс моделей, достаточно широк: от нескольких десятков мегаэлектронвольт до нескольких гигаэлектронвольт. В некоторых программах, например, в каскадной модели INCL4, соединенной с испарительной моделью ABLA [8], предравновесная стадия отсутствует. Расчеты по программам INCL4/ABLA, CEM03 и LAQGSM [9 – 11] дают хорошее согласие с экспериментальными данными в широком диапазоне энергий налетающих частиц и массовых чисел ядер-мишеней. Однако ни одна из существующих моделей не способна воспроизвести экспериментальные данные во всей энергетической области и для всех ядер-мишеней.

Среди всего набора каскадных моделей модель, разработанная в Дубне в конце 60-х годов прошлого века [12], занимает особое место. Развитие внутриядерного каскада в данном случае моделируется во времени. В течение последних 20-ти лет

данная модель развивалась в Обнинском институте атомной энергетики (ИАТЭ, в настоящее время Обнинский филиал НИЯУ МИФИ), на ее основе был создан комплекс программ CASCADE/INPE [13] для расчета переноса частиц. Эта модель была объединена со статистической моделью, описывающей равновесную эмиссию частиц. Новая программа, получившая название CASCADEX (CASCADE eXtended) [14], предназначена для моделирования взаимодействий налетающих частиц и ядер с массовым числом до 240 а.е.м. с веществом. Массовые числа ядер-мишеней (A) варьируются в диапазоне от двух до 240 а.е.м. Энергии налетающих частиц составляют до 2 ГэВ/нуклон для ядер-мишеней с массой меньше 40 а.е.м. и до 1 ГэВ/нуклон для ядер тяжелее 40 а.е.м.

В 2008 г. эксперты по физике высоких энергий в рамках соответствующего совместного проекта МАГАТЭ по верификации моделей реакций глубокого расщепления пришли к выводу, что существующие модели реакций необходимо верифицировать на всей доступной совокупности экспериментальных данных с целью определения точности и надежности получаемых с их помощью данных в различных массовых и энергетических диапазонах. Количественное сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными целесообразно проводить в рамках реализации многокритериальной парадигмы – посредством расчета всей совокупности факторов расчетно-экспериментального согласия.

ФАКТОРЫ СОГЛАСИЯ

Для сравнения результатов расчетов по моделям с экспериментальными данными в настоящее время используются следующие факторы согласия: F -, H -, R -, D -факторы (см. табл. 2) [15, 16]. Как правило, при интерпретации результатов оценки руководствуются однокритериальной парадигмой – выделяется один критерий, а наличие остальных игнорируется. Это обеспечивает однозначный способ выбора оптимальной модели расчета для различных ядер и энергетических диапазонов или параметров моделей. Следует отметить, что различные исследовательские коллективы отдают предпочтения различным критериям согласия, что приводит к различным результатам. В ряде работ были предприняты попытки оценить всю совокупность факторов, на основе результатов которых делалась экспертная оценка по выбору лучшей модели. Одновременный учет всех факторов согласия возможен в рамках реализации многокритериальной парадигмы оценки на основе методов поддержки принятия решений при многих критериях, что позволяет включить в рассмотрение всю совокупность критериев согласия [17, 18].

Для демонстрации применимости многокритериальной парадигмы для оценки прогностической способности моделей реакции глубокого расщепления были рассмотрены реакции взаимодействия мишени из ^{nat}Pb с высокоэнергетическим протоном. Выбор данного типа реакций связан с тем, что для мишени ^{nat}Pb имеется большой набор экспериментальных данных, поскольку свинец рассматривается как основной материал для ряда проектов электроядерных установок. Экспериментальные значения были взяты из базы данных EXFOR, а также из баз данных, использованных в проекте МАГАТЭ «Benchmark of Spallation Models». На рисунке 1 в качестве примера представлены функции возбуждения для реакции $^{nat}\text{Pb}(p,^{207}\text{Bi})$, рассчитанные с использованием различных моделей. В таблице 3 представлены значения факторов согласия для реакции $^{nat}\text{Pb}(p,x)$. Для оценки факторов согласия было выбрано 279 экспериментальных значений сечений ядер отдачи ^{nat}Pb при значениях энергии налетающего протона в диапазоне 70 – 2600 МэВ.

Таблица 2

Факторы согласия

F-фактор	$\langle F \rangle = N^{-1} \sum_{i=1}^N F_i = 10^{\sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N (\lg(\sigma_i^{\text{exp}}) - \lg(\sigma_i^{\text{calc}}))^2}}$
H-фактор	$H = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N [(\sigma_i^{\text{exp}} - \sigma_i^{\text{calc}}) / \Delta \sigma_i^{\text{exp}}]^2}$
D-фактор	$D = N^{-1} \sum_{i=1}^N [(\sigma_i^{\text{exp}} - \sigma_i^{\text{calc}}) / \sigma_i^{\text{exp}}]^2$
R-фактор	$R = N^{-1} \sum_{i=1}^N \sigma_i^{\text{calc}} / \sigma_i^{\text{exp}}$

Таблица 3

Значение факторов согласия реакции ${}^{\text{nat}}\text{Pb}(p, x)$

Модели высокоэнергетических реакций	Факторы согласия			
	H	D	R	F
Cascade-4	6.17	0.69	0.91	5.14
Cascade / ASF	4.62	0.49	0.91	2.57
CASCADEX-1.2	5.82	0.71	0.46	10.98
CEM02	4.84	0.51	1.05	2.44
CEM03	5.21	0.56	1.06	2.46
geant4 / Bertini	14.80	1.02	1.40	4.00
geant4 / binary	4.39	0.53	0.69	3.73
INCL45 / Abla07	9.61	0.81	1.51	2.04
INCL45 / Gemini	20.26	1.28	2.04	2.48
INCL45 / smm	9.57	0.87	1.27	3.67
Bertini / Dresner	7.37	0.72	1.15	2.59
Isabela / Abla07	13.13	1.08	1.77	2.29
Isabel / Gemini	30.30	1.70	2.49	2.79
Isabela / smm	10.04	0.92	1.35	4.04
Phits / jqmd	42.86	2.23	2.26	6.43
Phits4 / jam	5.63	0.54	0.93	2.12
Phits / Bertini	6.75	0.61	1.16	2.08

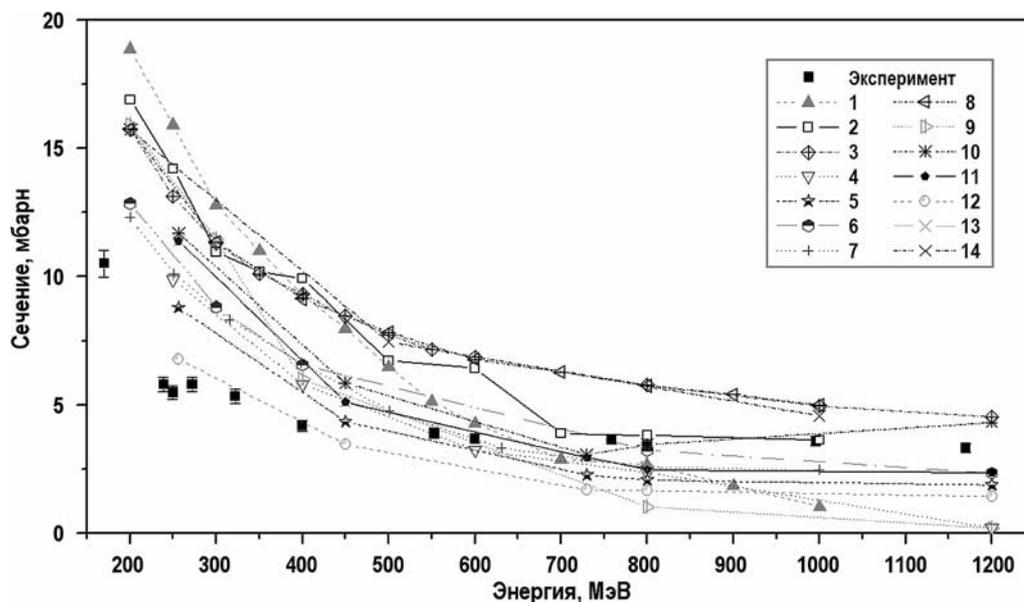


Рис. 1. Функции возбуждения для реакции $^{nat}\text{Pb}(p,^{207}\text{Bi})$, рассчитанные по различным моделям:

- 1 – Cascad/ASF; 2 – Cascad-4; 3 – CEM-02; 4 – CASCADeX-1.2;
 5 – INCL45/Abla07; 6 – geant4/binary; 7 – Bertini/Dresner; 8 – CEM-03;
 9 – geant4/Bertini; 10 – Isabela/Abla07; 11 – INCL4/Gemini++; 12 – INCL45/smm;
 13 – Isabel/Gemini; 14 – Phits/Bertini

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ

Методы многокритериального анализа решений (MCDA, от англ. Multi-Criteria Decision Analysis) являются инструментом, предназначенным для поддержки принятия решений лицами, сталкивающимися с необходимостью выбора в ситуации, характеризующейся многочисленными и противоречивыми факторами [19]. Данные методы предназначены для выявления противоречий и поиска компромиссов в процессе принятия решений. Задачи, для которых предназначены методы группы MCDA, состоят из конечного числа альтернатив, каждая из которых представлена количественной оценкой всех характеризующих ее критериев, заданных в явном виде в начале процесса рассмотрения. Большое количество методов группы MCDA были разработаны и предназначены для решения различного рода проблем (выбор наиболее предпочтительной альтернативы, ранжирование, сортировка (классификация) и отбор (скрининг) альтернатив). Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки и может быть более или менее полезным в зависимости от конкретной ситуации.

Для анализа устойчивости результатов ранжирования моделей к значениям весовых факторов, характеризующих собой относительную значимость критериев сравнения, был применен стохастический подход к генерации весов, что позволяет оценить разброс в итоговых баллах моделей, обусловленный неопределенностями весов, и выполнить ранжирование моделей в условиях отсутствия информации касательно значимости отдельных факторов согласия. В рамках данного метода предполагалось, что все веса распределены случайным образом равномерно в диапазоне от нуля до единицы, на их возможные значения накладывается только условие нормализации (в рамках аддитивной модели MAVT сумма весов долж-

на быть равной единице). Для каждого набора весов выполнялась оценка итоговых баллов для каждой из рассмотренных моделей на основе MAVT. Это позволяет определить функции распределения вероятности итоговых баллов и рангов моделей, отражающих влияние неопределенностей в весовых факторах. Основываясь на данной информации, можно определить вероятность предпочтения определенной модели. Результаты ранжирования могут быть изображены в формате диаграммы «ящик с усами» (диаграмма размаха), представляющей собой удобный способ отображения числовых данных, разбитых на четыре квантили.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАНЖИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Оценки, представленные в данной работе, были сделаны с использованием следующих, хорошо известных и широко используемых методов MCDA: MAVT (Multi-attribute Value Theory), MAUT (Multi-attribute Utility Theory), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution), PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), AHP (Analytic Hierarchy Process), что позволяет выявить робастность результатов ранжирования по отношению к используемому методу ранжирования. Все методы реализованы в их простейшей форме. В базовом расчете принято предположение о равной значимости всех факторов согласия.

Таблица 4

Результаты ранжирования моделей для реакции $^{nat}\text{Pb}(p,x)$ (равные веса)

Ранг	Методы MCDA				Группа привлекательности моделей
	MAVT/ MAUT	AHP	TOPSIS	PROMETHEE	
1	CEM02	CEM02	Phits4/jam	CEM02	1
2	Phits4/jam	Phits4/jam	CEM03	CEM03	
3	Cascade/ASF	CEM03	Phits/Bertini	Phits4/jam	
4	CEM03	Cascade/ASF	Cascade/ASF	Cascade/ASF	
5	Phits/Bertini	Phits/Bertini	CEM02	Phits/Bertini	
6	Bertini/Dresner	Bertini/Dresner	Phits/jqmd	Bertini/Dresner	2
7	Cascade 4	Cascade 4	Isabela/smm	Cascade 4	
8	INCL45/abla07	INCL4/abla07	Cascade 4	INCL45/smm	
9	INCL45/smm	Isabela/smm	INCL45/Abla	Isabela/smm	
10	geant4/ binary	geant4/binary	geant4/ binary	geant4/binary	
11	Isabela/smm	INCL4/smm	INCL45/Gemini	geant4/Bertini	
12	geant4/Bertini	geant4/Bertin	Bertini/Dresner	INCL4/Abla07	3
13	Isabela/Abla07	Isabela/Abla07	geant4/Bertini	geant4/Bertini	
14	INCL45/Gemini	INCL45/Gemini	Isabel/Gemini	INCL45/Gemini	
15	CASCADeX-1.2	CASCADeX-1.2	INCL45/smm	CASCADeX-1.2	
16	Isabel/Gemini	Isabel/Gemini	Isabela/Abla07	Isabel/Gemini	
17	Phits/jqmd	Phits/jqmd	CASCADeX-1.2	Phits/jqmd	

В таблице 4 показаны результаты ранжирования моделей (ранги) с использованием различных методов и их объединения в группы (близость значений интегрального показателя). Как видно, использование различных методов дискретного многокритериального анализа решений для оценки прогностической способности реакции глубокого расщепления приводит, несмотря на некоторые различия в ранжировании модели, к хорошо согласованным и аналогичным результатам. Несмотря на то, что на результаты ранжирования моделей влияют веса отдельных критериев,

имеются области устойчивости, в которых в широких пределах изменения значения весов порядок ранжирования сохраняется.

Для уточнения значения весов, отражающих представления экспертов о важности тех или иных факторов расчетно-экспериментального согласия, требуется провести экспертную оценку по выбору их значения. Однако, чтобы не определять значения весовых коэффициентов, можно провести оценку влияния неопределенностей в весах на итоговые баллы моделей посредством применения метода стохастической генерации весов, который позволяет ранжировать модели в отсутствие информации о значимости факторов согласия, а также при необходимости и вероятность предпочтения определенной модели.

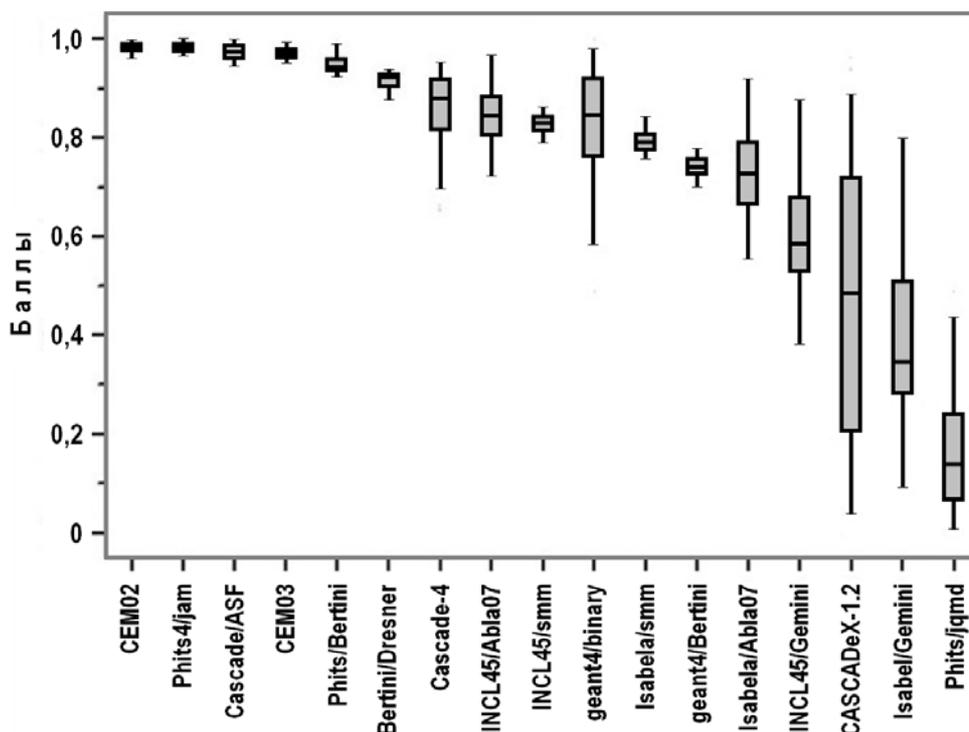


Рис. 2. Результаты ранжирования моделей с учетом неопределенностей в весах факторов согласия

На рисунке 2 показаны результаты ранжирования моделей по методу MAVT с учетом неопределенности в значениях весов в формате диаграммы размаха (на графике указаны 95, 75, 50, 25, 5% квантили распределений). Модели на графике расположены в соответствии со значениями средних баллов. Выполненный анализ влияния неопределенности подтверждает результаты ранжирования, полученного с использованием различных методов. Лучшими моделями могут считаться модели первой группы, включая CEM02, CEM03, Phits/jam, Cascade/ASF, Phits/Bertini. Модели Bertini/Dresner, Cascade-4, INCL4/Abla, INCL4/smm, geant4/binary, Isabela/smm, geant4/Bertini могут быть отнесены ко второй группе привлекательности. Модели Isabela/Abla, INCL4/Gemini, CASCADeX-1.2, Isabel/Gemini, Phits/jqmd характеризуются большей неопределенностью и могут быть объединены в третью группу привлекательности.

Анализируя полученные результаты, необходимо отметить, что модели CEM02, CEM03, Cascade/ASF, geant4/Bertini, geant4/binary, не содержащие в своем алгоритме предравновесную стадию, входят в первую и вторую группы, что говорит о сомнительных преимуществах учета предравновесной модели. Значительное расхож-

дение в оценке предсказательной способности программы CASCADEX-1.2 может быть объяснено тем, что заложенная в ней модель использует вместо наиболее часто используемого формализма Хаузера-Фешбаха [20] модель Вайтскопа-Ивинга [21] для описания медленной испарительной стадии. Модель, основанная на квантово-молекулярной динамике (Phits/jqmd), несмотря на более сложное представление быстрой каскадной стадии реакции, пока плохо описывают реакции глубокого расщепления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многокритериальный подход к оценке предсказательных способностей моделей высокоэнергетических ядерных реакций на основе методов дискретного многокритериального анализа решений позволяет более тонко дифференцировать различные модели, что является дополнительным инструментом как понимания механизмов ядерной реакции, так и подготовки надежного константного обеспечения. Применение различных методов многокритериального анализа решений для оценки предсказательных способностей моделей реакций глубокого расщепления показывает, что несмотря на некоторые различия в ранжировании моделей результаты, получаемые с использованием различных методов, оказываются хорошо согласованными. Результаты ранжирования моделей в условиях неопределенности весовых факторов коррелируют с результатами ранжирования, полученными на основе классических методов. На основании результатов анализа чувствительности с учетом дополнительного анализа альтернатив с использованием экспертных оценок и всего множества графической и атрибутивной информации лучшими моделями могут быть признаны модели семейства CEM, Phits, Cascade.

Литература

1. Конобеев А.Ю., Коровин Ю.А., Пильнов Г.Б., Станковский А.Ю., Андрианов А.А. Оцененные транспортные файлы для исследования переноса частиц в материалах, облучаемых нейтронами с энергией до 150 МэВ. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2004. – № 4. – С. 56-62.
2. Leray S. Needs for a benchmark of spallation models for reliable simulation of spallation related applications/ PSI Proceedings 09-01. – ARIA. – 2009. – P. 89.
3. Hendricks J.S. MCNPX Version 26C. Report LA-UR-06-7991. – 2006.
4. Sato T., Niita K., Matsuda N. et al. Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, version 2.52 // Journal of Nuclear Science and Technology – 2013. – Vol. 50. – No. 9. – PP. 913-923, DOI: 10.1080/00223131.2013.814553.
5. Agostinelliae S. et. al. Geant4 – a simulation toolkit// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2003. – Vol. 506. – PP. 250-303.
6. Battistoni G. et. al. Overview of the FLUKA code // Annals of Nuclear Energy – 2015. – Vol. 82. – PP. 10-18.
7. Mokhov N.V. et. al. Physics Models in the MARS15 Code for Accelerator and Space Applications. / Fermilab-Conf-04/269-AD – ND2004 paper.
8. Mank G., Filges D., Leray S., Yariv Y. Joint ICTP-IAEA Advanced Workshop on Model Codes for Spallation Reactions – 2008. Электронный ресурс: www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds0530/ (дата доступа 05.02.2018).
9. Boudard A., Cugnon J., Leray S., Volant C. Intranuclear cascade model for a comprehensive description of spallation reaction data// Phys. Rev. C. – 2002. – Vol. 66. – 044615, 28 p.
10. Mashnik S.G. et al. CEM03.03 and LAQGSM03.03 Event Generators for the MCNP6 / MCNPX and MARS15 Transport Codes. – 2008. – LANL Report LA-UR-08-2931.
11. Mashnik S. Validation and Verification of MCNP6 Against High-Energy Experimental Data and Calculations by Other Codes. II. The LAQGSM Testing Primer, 2001. – LANL Report LA-UR-11-05627.

12. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. – 1972. – М.: Атомиздат. – 351 с.
13. Барашенков В.С., Конобеев А.Ю., Коровин Ю.А., Соснин В.Н. Компьютерная программа CASCADE/IPPE // Атомная Энергия. – 1999. – № 87. – С. 283.
14. Андрианов А.А., Конобеев А.Ю., Коровин Ю.А., Купцов И.С., Станковский А.Ю. Усовершенствованный программный комплекс CASCADEX 1.2 для расчета реакций глубокого расщепления. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2011. – № 2. – С. 5-16.
15. Andrianov A.A., Korovin Y.A., Kuptsov I.S., Stankovskiy A.Y. Interactive information system for preparation and verification of nuclear data in the high-energy range. // Journal of the Korean Physical Society. – 2011. – Vol. 59. – No. 23. – PP. 1096-1099.
16. Andrianov A., Dogov A., Kuptsov I., Svetlichnyy L., Korovin Yu. Integrated software tools for radiation damage, activation and transmutation studies in advanced nuclear systems. / В сборнике: «Physics of Reactors 2016, PHYSOR 2016: Unifying Theory and Experiments in the 21-st Century». – 2016. – PP. 3020-3029.
17. Андрианов А.А., Грицюк С.В., Коровин Ю.А., Купцов И.С. Многокритериальная оценка моделей реакции глубокого расщепления. // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 226.
18. Andrianov A., Kuptsov I., Andrianova O., Konobeev A., Korovin Yu. Multi-criteria comparative evaluation of spallation reaction models. / В сборнике: EPJ Web of Conferences 22. – 2017.
19. Yatsalo B., Gritsyuk S., Sullivan T., Trump B., Linkov I. Multi-criteria risk management with the use of DecernsMCDA: methods and case studies. // Environment Systems and Decisions. – 2016. – Vol. 36. – No. 3. – PP. 266-276. – DOI: 10.1007/s10669-016-9598-1.
20. Hauser W., Feshbach H. The Inelastic Scattering of Neutrons // Phys. Rev. – 1952. – Vol. 87. – P. 366.
21. Weisskopf V.F., Ewing D.H. On the Yield of Nuclear Reactions with Heavy Elements. // Phys. Rev. – 1940. – Vol. 57. – P. 472.

Поступила в редакцию 01.04.2017 г.

Авторы

Андрианов Андрей Алексеевич, доцент, канд. техн. наук

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Коровин Юрий Александрович, зав. кафедрой, профессор, др. физ.-мат. наук

E-mail: korovin@ippe.ru

Купцов Илья Сергеевич, доцент, катд. физ.-мат. наук

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru

Конобеев Александр Юрьевич, др. физ.-мат. наук

E-mail: alexander.konobeev@kit.edu

Андрианова Ольга Николаевна, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: oandrianova@ippe.ru

UDC 539.172.128.17

COMPARISON OF SPALLATION REACTION MODELS USING MCDAAndrianov A.A. *, Korovin Yu.A. *, Kuptsov I.S. *, Konobeev A.Yu. **,
Andrianova O.N. ***

* NRNU «MEPhI»,

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

** Institute for Neutron Physics and Reactor Technology, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

1 Hermann-von-Helmholtz-Platz, Eggenstein-Leopoldshafen, 76344 Germany

*** JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

The paper presents an approach to a comparative evaluation of the predictive ability of spallation reaction models based on widely used, well-proven multiple-criteria decision analysis methods (MAVT/MAUT, AHP, TOPSIS, PROMETHEE) and the results of such a comparison for 17 spallation reaction models in the presence of the interaction of high-energy protons with ^{nat}Pb . A multi-criteria approach to a comparative evaluation of high-energy nuclear reaction models as well as evaluated nuclear data obtained by using these models makes it possible to more finely differentiate various models with due account for experts' opinions, which makes an additional contribution to both the understanding of nuclear reaction mechanisms and preparation of a reliable nuclear data set. The best models can be considered those of the first group including: CEM02, CEM03, Phits/jam, Cascade/ASF, Phits/Bertini. The models Bertini/Dresner, Cascade-4, INCL4/ABLA, INCL4/SMM, geant4/binary, Isabela/SMM, geant4/Bertini may be referred to the second in attractiveness group. The models Isabela/Abla, INCL4/Gemini, CASCADEX-1.2, Isabel/Gemini, phits/jqmd, which are characterized with a greater uncertainty, may be united into the next in attractiveness group. The study has shown that if the MCDA methods are applied to evaluating the predictive ability of spallation reaction models, despite some differences in model ranking, the results obtained by using different methods turn out to give good fits. The study demonstrates that taking into account the sensitivity analysis results, an additional alternative analysis using experts' judgments and the whole set of geographical and attributive information, it becomes possible to select the best models.

Key words: spallation nuclear reactions, nuclear data, multi-criteria analysis, uncertainty.

REFERENCES

1. Konobeyev A.Yu., Korovin Yu.A., Pilnov G.B., Stankovskiy A.Yu., Andrianov A.A.. Transport Evaluated Files to Study Particle Transport in Materials Irradiated by Neutrons with Energies up to 150 MeV. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedenij. Yadernaya energetika*. 2004, no. 4, pp. 56-62 (in Russian).
2. Leray S. Needs for a benchmark of spallation models for reliable simulation of spallation related applications/ PSI Proceedings 09-01. ARIA. 2009, p. 89.
3. Hendricks J.S. MCNPX Version 26C. Report LA-UR-06-7991, 2006.
4. Sato T., Niita K., Matsuda N., Hashimoto Sh., Iwamoto Y., Noda Sh., Ogawa T., Iwase H., Nakashima H., Fukahori T., Okumura K., Kai T., Chiba S., Furuta T., Sihver L. Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, ver. 2.52. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2013, v. 50, no. 9, pp. 913-923, DOI: 10.1080/00223131.2013.814553.
5. Agostinelliae S., Allisonas J., Amakoe K., Apostolakisa J. Geant4 – a Simulation Toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2003, v. 506, pp. 250-303.

6. Battistoni G., Boehlen T., Cerutti F., Chin P. W. Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, v. 82, pp. 10-18.
7. Mokhov N. V., Gudima K. K., Mashnik S. G., Kostin M. A. Physics Models in the MARS15 Code for Accelerator and Space Applications, Fermilab-Conf-04/269-AD, ND2004 paper.
8. Mank G., Filges D., Leray S., Yariv Y. Joint ICTP-IAEA Advanced Workshop on Model Codes for Spallation Reactions, 2008, Available at: <https://www-nds.iaea.org/spallations/2008ws/mank.pdf> (accessed Feb 05 2018).
9. Boudard A., Cugnon J., Leray S., Volant C. Intranuclear cascade model for a comprehensive description of spallation reaction data. *Phys. Rev. C* 2002, v. 66, 044615, pp. 1-28.
10. Mashnik S. G., Gudima K. K., Prael R. E., Sierk A. J., Baznat M. I., Mokhov N. V. CEM03.03 and LAQGSM03.03 Event Generators for the MCNP6, MCNPX, and MARS15 Transport Codes, 2008. LANL Report LA-UR-08-2931.
11. Mashnik S. Validation and Verification of MCNP6 Against High-Energy Experimental Data and Calculations by Other Codes. II. The LAQGSM Testing Primer, 2001. LANL Report LA-UR-11-05627.
12. Barashenkov V. S.; Toneev V. D. *Interactions of high energy particles and atomic nuclei with nuclei*. Moscow. Atomizdat Publ., 1972, 351 p. (in Russian).
13. Barashenkov V. S., Konobeev A. Yu., Korovin Yu. A., Sosnin V. N. CASCADE/INPE code system. *Atomnaya Energiya*, 1999, v. 87, no. 4, pp. 742-744 (in Russian).
14. Andrianov A. A., Konobeev A. Yu., Korovin Yu. A., Kuptsov I. S., Stankovsky A. Yu. The improved program code CASCADEX 1.2 for spallation reactions calculation. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedenij. Yadernaya energetika*. 2011, no. 2, pp. 5-16 (in Russian).
15. Andrianov A. A., Korovin Y. A., Kuptsov I. S., Stankovskiy A. Y. Interactive information system for preparation and verification of nuclear data in the high-energy range. *Journal of the Korean Physical Society*, 2011, v. 59, no. 23, pp. 1096-1099.
16. Andrianov A., Dogov A., Kuptsov I., Svetlichnyy L., Korovin Yu. Integrated software tools for radiation damage, activation and transmutation studies in advanced nuclear systems. In: «Physics of Reactors 2016, Proceedings: PHYSOR 2016 Conference: Unifying Theory and Experiments in the 21-st Century», 2016, pp. 3020-3029
17. Andrianov A. A., Gritsyuk S. V., Korovin Yu. A., Kuptsov I. S. Multi-criteria comparative evaluation of spallation reaction models. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*, 2013, v. 2, no. 2, p. 226 (in Russian).
18. Andrianov A., Kuptsov I., Andrianova O., Konobeev A., Korovin Yu. *Multi-criteria comparative evaluation of spallation reaction models*. Proc.: EPJ Web of Conferences 22, 2017, Series: "ND 2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology", p. 12007.
19. Yatsalo B., Gritsyuk S., Sullivan T., Trump B., Linkov I. Multi-criteria risk management with the use of DecernsMCDA: methods and case studies. *Environment Systems and Decisions*, 2016, v. 36, no. 3, pp. 266-276. DOI: 10.1007/s10669-016-9598-1.
20. Hauser W., Feshbach H. The Inelastic Scattering of Neutrons. *Phys. Rev.* 1952, v. 87, p. 366.
21. Weisskopf V. F., Ewing D. H. On the Yield of Nuclear Reactions with Heavy Elements. *Phys. Rev.* 1940, v. 57, p. 472.

Authors

Andrianov Andrey Alekseevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Korovin Yuri Aleksandrovich., prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department

E-mail: korovinyu@mail.ru

Kuptsov Ilya Sergeevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru

Konobeev Alexander Yurevitch., Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: alexander.konobeev@kit.edu

Andrianova Olga Nikolaevna, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: oandrianova@ippe.ru