

**Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Государственный Научный Центр Российской Федерации  
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики»**

На правах рукописи

**Павлов Кирилл Владимирович**

**Измерение сечений образования  
радиоактивных продуктов  
при облучении мишеней из  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$   
протонами промежуточных и высоких энергий**

Специальность: 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2011 г.

УДК 621.039.584

Работа выполнена в ФГУП «ГНЦ РФ ИТЭФ», г. Москва.

**Научный руководитель:** доктор физ.-мат. наук Титаренко Ю. Е.  
(ФГУП «ГНЦ РФ ИТЭФ», г. Москва)

**Официальные оппоненты:** доктор физ.-мат. наук Куликов В. В.  
(ФГУП «ГНЦ РФ ИТЭФ», г. Москва)

доктор физ.-мат. наук Улин С. Е.  
(НИЯУ МИФИ, г. Москва)

**Ведущая организация:** Обнинский институт атомной энергетики  
(Калужская обл., г. Обнинск)

Защита диссертации состоится “21” июня 2011 г. в “11” часов на заседании диссертационного совета Д 201.002.01 в конференц-зале «ГНЦ РФ ИТЭФ» по адресу: г. Москва, ул. Б. Черемушкинская, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ. Также диссертация и автореферат доступны по запросу через электронную почту [Kirill.Pavlov@itep.ru](mailto:Kirill.Pavlov@itep.ru)

Автореферат разослан “18” мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук

Васильев В. В.

## Общая характеристика работы

Проблемы безопасности ядерно-энергетических установок, обращения с ядерными отходами и замыкания ядерного топливного цикла остаются наиболее приоритетными проблемами ядерной энергетики. В последние годы для их решения созданы программы, в которых, наряду с вопросами повышения ядерной безопасности различных типов реакторов, рассматриваются вопросы природных ресурсов, накопления, хранения и переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ), радиохимического выделения и трансмутации минорных актинидов ((МА) – Np, Am, Cm) и долгоживущих продуктов деления (ПД), а также конверсии сырьевых изотопов ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ), соответственно, в делящиеся ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$ ). В качестве основных направлений в этих программах выделены: объекты трансмутации (МА, ПД), режимы радиохимической переработки ОЯТ, промышленная трансмутация на базе инновационных ядерно-энергетических установок с blanketами на быстрых нейтронах.

Современные тенденции развития ядерной энергетики основываются на количественном росте числа атомных электростанций с тиражированием водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) с открытым ядерным топливным циклом (ОЯТЦ), и только в будущем предполагается их перевод на замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ). По разным оценкам, приемлемые запасы урана могут быть исчерпаны уже в течение этого века. Поэтому национальные программы по созданию крупномасштабной ядерной энергетики с ЗЯТЦ рассматривают два основных сценария: увеличение доли быстрых реакторов (БР) и трансмутация МА с их применением; увеличение доли БР и сокращение доли ВВЭР, введение дополнительных специальных «реакторов выжигателей/конверторов».

При этом в ряде программ, как наиболее перспективные, рассматриваются концепции: «реактора выжигателя/конвертора» на расплавленных солях, концепции подкритических blanketов с источниками нейтронов на базе пучка протонов сильноточного ускорителя и свинцовой мишени или на базе термоядерных реакций (ТОКАМАК).

Для всех перечисленных ядерно-энергетических установок требуется широкий спектр конструкционных материалов, но особый интерес вызывают

материалы, которые применяются в ускорительно-реакторной или термоядерно-реакторной технологиях.

В атомной технике широко используются сплавы на основе Zr с добавлением Nb (сплав Н-1.1, содержащий 1% Nb; сплав Н-2.5, содержащий 2.5% Nb), из которых изготавливаются элементы конструкции активных зон ядерных реакторов. В ускорительной технике традиционные сверхпроводники (сплавы Nb-Ti, соединение Nb<sub>3</sub>Sn) применяются в сверхпроводящих магнитных системах в виде композитов с матрицей из нормального металла с высокими тепло- и электропроводностью. Нержавеющие стали и сплавы на основе Ni и Cr используются в качестве оболочек поглощающих элементов, пружинных элементов ТВС и в отдельных случаях для дистанционирующих решеток ТВС.

В соответствии с базой ядерных данных Nuclear Wallet Cards, при взаимодействии высокоэнергетических протонов с различными материалами (до Bi включительно) могут образоваться ~ 3170 продуктов реакций, из которых 281 стабильных изотопов и 2889 радиоактивных (вместе с метастабильными состояниями, число которых 582).

Радиоактивные и стабильные продукты реакций (РПР и СПР, соответственно) образуются непосредственно в ходе ядерной реакции. Причем радиоактивные образуются как в ходе ядерной реакции, так и в ходе распада независимо образовавшихся их генетических предшественников. В соответствии с принятой терминологией сечения образовавшихся нуклидов можно разделить по типу продуктов реакций на: независимые – **(i)**; суммы значений независимого метастабильного и основного состояний – **i(Σm<sub>i</sub>+g)**; независимые метастабильные – **i(m)**; кумулятивные и супракумулятивные – **c, c\***.

Точные данные о сечениях ядерных реакций играют чрезвычайно важную роль в фундаментальных и прикладных исследованиях. В настоящее время сечения образования продуктов реакций определяются с использованием двух методик – обратной и прямой кинематики. В первой из них водородная мишень облучается пучком ионов ( ${}^A_zT \rightarrow {}^1_1H$ ), измеряются массовые и зарядовые распределения продуктов реакций и определяются только независимые сечения ядерных реакций. Во второй тонкая мишень облучается пучком протонов ( ${}^1_1H \rightarrow {}^A_zT$ ) и образовавшиеся в ней продукты реакций, как без химической сепарации, так и с сепарацией выбранных продуктов реакций, измеряются мето-

дами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -спектрометрии на базе Si, Ge или жидких сцинтилляционных детекторов высокого разрешения (иногда обозначается как активационная методика). В этом случае определяются в основном кумулятивные сечения продуктов реакций и лишь частично независимые и метастабильные. Как правило, при использовании этой методики, короткоживущие нуклиды с периодом полураспада до 5 минут ( $\sim 1981$  ядер) не регистрируются. Остальные ( $\sim 880$  ядер) с периодом полураспада от 5 минут до  $\sim 10^3$  лет достаточно надежно регистрируются методами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -спектрометрии и еще 25 с периодами полураспада  $\sim 10^3$ - $10^4$  лет могут быть зарегистрированы с использованием низкофоновых спектрометров.

Одновременно с развитием экспериментальных методов развиваются и расчетные методики – высокоэнергетические транспортные программы (ВЭТП), задача которых предсказать сечения ядерных реакций в требуемом диапазоне масс-мишеней и энергий налетающих протонов. Оценка их предсказательной способности осуществляется с использованием полученных экспериментальных данных.

Экспериментальное определение сечений образования радиоактивных продуктов реакций при взаимодействии протонов промежуточных и высоких энергий с  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$  как с важнейшими конструкционными материалами, используемыми в реакторной и ускорительной технологиях, и верификация ВЭТП, с применением полученных данных, является предметом исследования настоящей диссертации, чем, принимая во внимание сказанное, определяется ее **актуальность**.

**Цель диссертационной работы** состоит в экспериментальном определении значений сечений образования радиоактивных продуктов реакций (РПР) при взаимодействии протонов промежуточных и высоких энергий с мишенями из  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$ , перспективными для использования в качестве конструкционных материалов критических и подкритических технологий и методологическом обосновании используемого метода мониторинговых реакций.

В соответствии с этим можно выделить **основные задачи диссертации**:

- 1) сбор и анализ имеющейся экспериментальной информации по протонным сечениям  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$ ;
- 2) обоснование метода исследований, выбора энергий налетающих прото-

нов;

3) методологическое обоснование используемого метода мониторинговых реакций;

4) формирование аппаратно-методического и информационного обеспечения эксперимента и его адаптация к условиям облучения на протонном синхротроне У-10 ИТЭФ;

5) проведение облучений образцов, физических измерений и обработка их результатов;

6) определение сечений образования РПР  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$  в широком диапазоне энергий протонов;

7) определение сечений мониторинговых реакций;

8) сравнение экспериментальных значений сечений РПР  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$ , где это возможно, с опубликованными ранее результатами;

9) сравнение мониторинговых сечений  $^{27}\text{Al}(p,x)^7\text{Be}$ ,  $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$  и  $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$  с опубликованными ранее результатами;

10) проведение расчетов по различным ВЭТП для определения сечений РПР для  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$ ;

11) верификация использованных ВЭТП путем сравнения полученных экспериментальных значений сечений РПР  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$  с расчетными данными.

### **Методы исследований**

В диссертационной работе используются следующие основные методические приемы:

1)  $\gamma$ -спектрометрия облученных протонами образцов исследуемых материалов без предварительной химической сепарации;

2) сопоставление полученных результатов с имеющимися экспериментальными и расчетными данными.

**Научная новизна** выполненных исследований заключается в следующем: определено 1112 значений сечений, что позволило получить 47 функций возбуждения для  $^{nat}\text{Ni}$  и 109 для  $^{93}\text{Nb}$ . Из них 9 и 66 функций возбуждения, соответственно, для  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$  представлены впервые. В уже изученных функциях возбуждения для  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$  получено 175 и 503 значения сечений в других, ранее не изученных, диапазонах энергий. С использованием полученных данных оценена предсказательная способность семи ВЭТП: BERTINI,

ISABEL, INCL4.2, CEM03.02, RHITS, INCL4.5, CASCADE07. Для 12 значений энергий определены значения трех мониторных реакций:  $^{27}\text{Al}(p,x)^7\text{Be}$ ,  $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$  и  $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$ .

#### **На защиту выносятся:**

1) методика и результаты измерений выходов РПП в протонных реакциях для следующих материалов:  $^{\text{nat}}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$  при одиннадцати энергиях протонов: 0.04, 0.07, 0.1, 0.15, 0.25, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6 и 2.6 ГэВ;

2) методика и результаты измерений сечений трех мониторных реакций  $^{27}\text{Al}(p,x)^7\text{Be}$ ,  $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$  и  $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$  при 12 энергиях протонов 0.04, 0.045, 0.07, 0.1, 0.15, 0.25, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6 и 2.6 ГэВ;

3) результаты сравнения полученных экспериментальных значений сечений с соответствующими расчетными данными и определение предсказательной способности высокоэнергетических транспортных программ.

#### **Практическое значение работы:**

1) возможность использования полученных данных для верификации и модификации ВЭТП, применяемых при создании и эксплуатации подкритических установок с источниками нейтронов на базе пучка протонов сильноточного ускорителя;

2) дополнение мировых баз данных по протонным сечениям.

#### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения (общих выводов по диссертации) и приложения, оформленного отдельным томом; имеет объем 121 страницу печатного текста; содержит 35 рисунков, 14 таблиц и библиографию (179 названий).

#### **Краткое содержание работы**

Во **Введении** рассмотрены перспективы ядерной энергетики, ее переход на ЗЯТЦ с использованием подкритических бланкетов с источником нейтронов на базе пучка протонов сильноточного ускорителя. Обоснован выбор исследуемых конструкционных материалов.

В **Главе 1** обсуждаются эксперименты, выполненные в обоснование проектов подкритических систем; представлен количественный анализ продуктов реакций, их периодов полураспада и возможности их экспериментального определения. Приведены результаты информационного анализа базы ядерных

данных по сечениям взаимодействия протонов с ядрами  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$ . В рамках предварительного планирования эксперимента анализируются возможности проведения сравнения получаемых данных с имеющейся экспериментальной информацией, полученной при помощи аналогичной методики, для общей оценки их достоверности.

В **Главе 2** представлена методика экспериментального определения и значения сечений мониторных реакций  $^{27}\text{Al}(p,x)^7\text{Be}$ ,  $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$  при 12 энергиях протонов: 2600, 1600, 1200, 800, 600, 400, 249, 147.6, 97.2, 66.0, 44.6 и 40.8 МэВ. Полученные данные позволяют получить систематизацию определения плотности потока протонов методом мониторных реакций и методом токовых трансформаторов. Для этого использовались результаты 92 экспериментов по измерению сечений образования ядер-продуктов в конструкционных материалах.

Число протонов, прошедших через образцы и мониторы определялось с использованием калиброванных токовых трансформаторов. Результаты измерений показаний токовых трансформаторов формировались специальной программой, которая представляла оцифрованную информацию в виде:

- 1) суммарной осциллограммы каждого облучения (рис. 1);
- 2) временной зависимости амплитуд протонных импульсов каждого облучения (рис. 2).

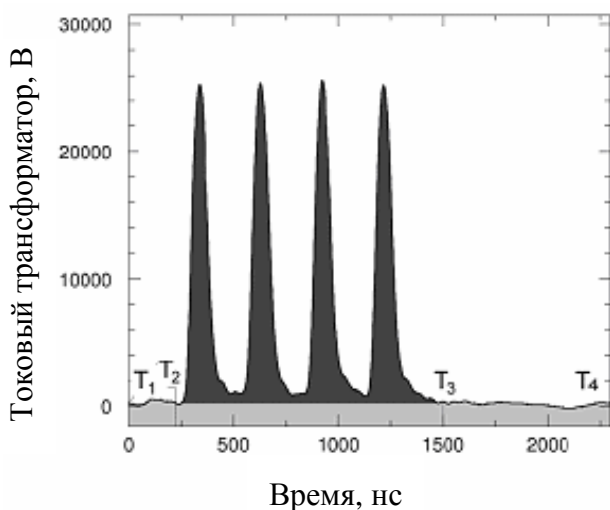


Рис. 1. Суммарная осциллограмма структуры протонного пучка

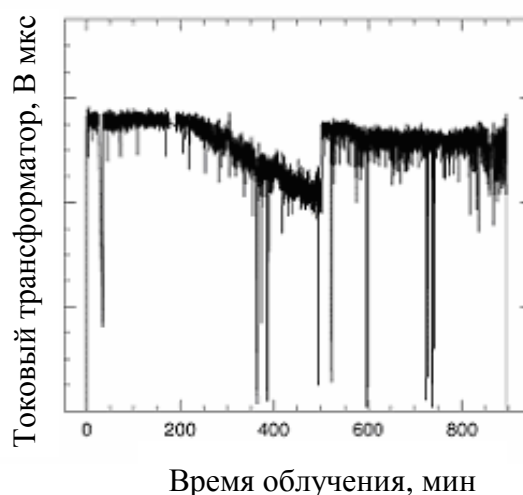


Рис. 2. Детальная временная структура цикла облучения

Формула для определения плотности потока протонов при использовании

токового трансформатора имеет вид

$$\hat{\Phi}_{\text{FCT}} = \frac{I \cdot t \cdot k_{\text{flux}}}{K \cdot e \cdot T_{\text{irr}} \cdot S}, \quad (1)$$

где  $\hat{\Phi}_{\text{FCT}}$  – плотность потока протонов при облучении образца;  $I$  – поканальная сумма в импульсах суммарных осциллограмм (В);  $t$  – ширина канала оцифровки (с);  $k_{\text{flux}}$  – отношение числа частиц, прошедших через образец к полному числу частиц;  $K$  – коэффициент преобразования сигнала токового трансформатора, (В/А);  $e$  – элементарный заряд (Кл);  $T_{\text{irr}}$  – время облучения;  $S$  – площадь образца.

Погрешность определения плотности потока частиц составила 4.2 %.

Скорости реакций образования  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{22}\text{Na}$  и  $^7\text{Be}$  в алюминиевых фольгах при использовании метода  $\gamma$ -спектрометрии вычислялись с использованием выражения (4). Сечения мониторинговых реакций и их погрешности определялись из выражений

$$S_i^{\text{cum/ind}} = \frac{\hat{R}_i^{\text{cum/ind}}}{\hat{\Phi}_{\text{FCT}}}, \quad (2)$$

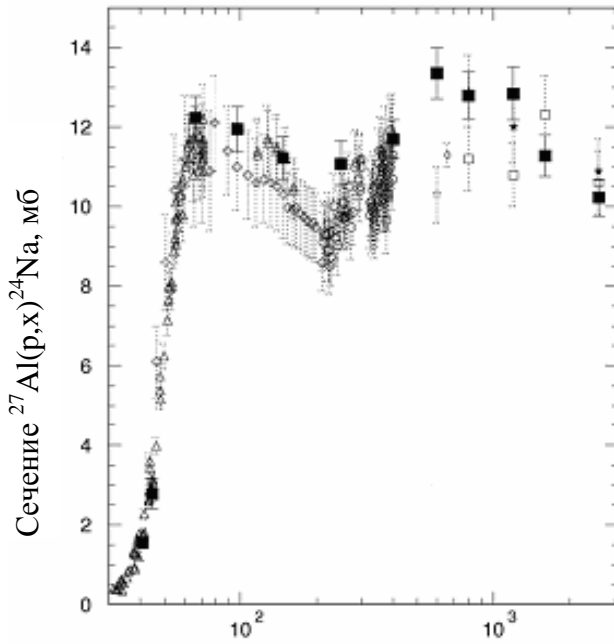
$$\frac{\Delta S_i^{\text{cum/ind}}}{S_i^{\text{cum/ind}}} = \sqrt{\left( \frac{\Delta \hat{R}_i^{\text{cum/ind}}}{\hat{R}_i^{\text{cum/ind}}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \hat{\Phi}_{\text{FCT}}}{\hat{\Phi}_{\text{FCT}}} \right)^2}, \quad (3)$$

где  $\hat{R}_i^{\text{cum/ind}}$  – кумулятивная/независимая скорость реакции  $i$ -го нуклида ( $i = ^{24}\text{Na}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^7\text{Be}$ )

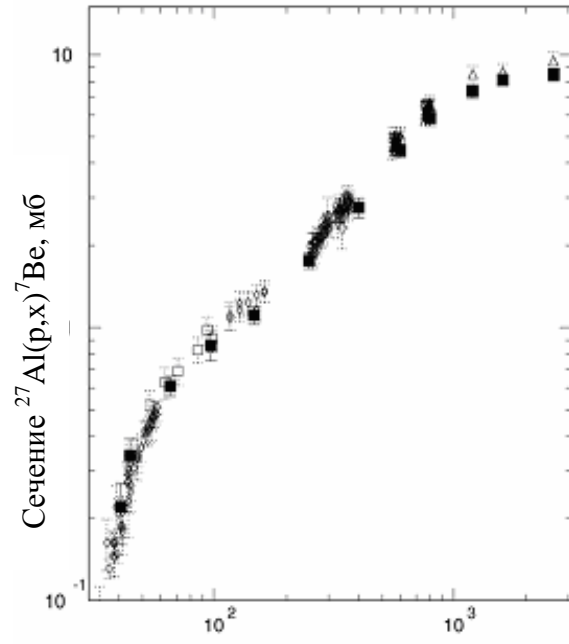
Результаты определения сечений мониторинговых реакций  $^{27}\text{Al}(p, x)^{24}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(p, x)^7\text{Be}$  и  $^{27}\text{Al}(p, x)^{22}\text{Na}$ , вместе с данными других лабораторий, представлены на рис. 3-5.

Вклад  $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ -реакции в образование  $^{24}\text{Na}$  не учитывался. Характерная погрешность определения сечения  $^{24}\text{Na} \approx 9\%$ ,  $^7\text{Be} \approx 14\%$  и  $^{22}\text{Na} \approx 6\%$ . Полученные результаты в пределах 5% совпадают с данными наиболее часто цитируемой работы J. Tobailem (1981), за исключением точек при энергиях 0.4 и 0.066 ГэВ (рис. 6), что свидетельствует о высокой надежности предложенной методики и возможности ее использования для измерения других мониторинговых реакций.

В **Главе 3** описана методика определения значений выходов РПР и их по-



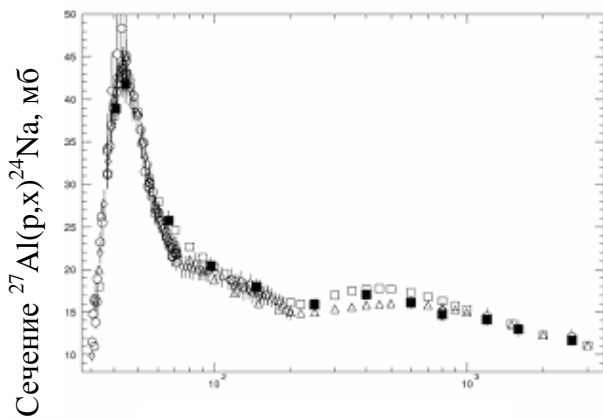
Энергия протонов, МэВ



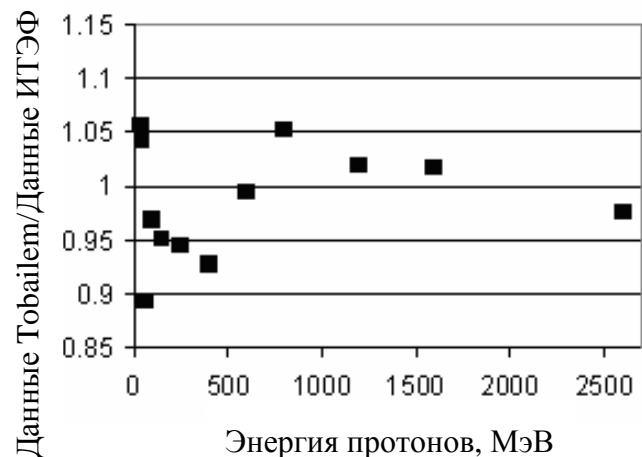
Энергия протонов, МэВ

Рис. 3. Функция возбуждения реакции  $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ : ■ – настоящая работа, □ – R. Michel (1995), ▼ – R. Michel (1997), ○ – Th. Scielke (1996), ★ – B. Dittrich (1990), ⊕ – R. Michel (1985), ◇ – R. Michel (1989), ☆ – R. Michel (1986), \* – R. Bodemann (1993)

Рис.4. Функция возбуждения реакции  $^{27}\text{Al}(p,x)^7\text{Be}$ : ■ – настоящая работа, ▼ – R. Michel (1995), ◇ – R. Michel (1997), ⊕ – Th. Scielke (1996), ○ – R. Michel (1989), □ – R. Bodemann (1993)



Энергия протонов, МэВ



Энергия протонов, МэВ

Рис. 5. Функция возбуждения реакции  $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$ . ■ – настоящая работа, ○ – R. Michel (1979, 1995, 1997), □ – J. Tobailem (1975), ▼ – J. Tobailem (1981), ◇ – G. F. Steyn (1990)

Рис. 6. Сравнение полученных данных с данными J. Tobailem (1981)

грешностей по результатам анализа первичной экспериментальной информации.

Регистрация продуктов реакций осуществлялась с использованием двух  $\gamma$ -спектрометров на базе Ge-детекторов с разрешением 1.8 и 1.7 кэВ для  $\gamma$ -линии 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$ . В качестве мониторинга использовалась реакция  $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$ . Формулы, используемые для определения скоростей ядерных реакций в образцах, для (одно) двухзвенной цепочки «генетически» связанных радионуклидов при импульсном облучении экспериментальных образцов протонами с амплитудной нестационарностью их структуры, имеют вид:

$$R_1^{cum/ind} = \frac{\hat{A}_1}{N_{Tag} \cdot h_1 \cdot e_1} \cdot \frac{1}{F_1}, \quad (4)$$

$$R_1^{cum/ind} = \frac{\hat{A}_2^1}{N_{Tag} \cdot h_2 \cdot e_2 \cdot n_{12}} \cdot \frac{I_2 - I_1}{I_2} \cdot \frac{1}{F_1}, \quad (5)$$

$$R_2^{ind} = \left( \frac{\hat{A}_2^2}{F_2} + \frac{\hat{A}_2^1}{F_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) \cdot \frac{1}{N_{Tag} \cdot h_2 \cdot e_2}, \quad (6)$$

$$R_2^{cum} = R_2^{ind} + n_{12} \cdot R_1^{cum/ind} = \left( \frac{\hat{A}_2^1}{F_1} + \frac{\hat{A}_2^2}{F_2} \right) \cdot \frac{1}{N_{Tag} \cdot h_2 \cdot e_2}, \quad (7)$$

где  $\hat{A}_1 = A_1 \cdot k_{m_1}$ ,  $\hat{A}_2^1 = A_2^1 \cdot k_{m_2}$ ,  $\hat{A}_2^2 = A_2^2 \cdot k_{m_2}$  – параметры, определяемые путем фитирования экспериментальных точек кривых распада «материнского» и «дочернего» ядер методом наименьших квадратов («материнский нуклид – индекс 1», «дочерний нуклид – индекс 2»);  $N_{Tag}$  – число ядер в облучаемом образце;  $\eta_1, \eta_2$  – абсолютные выходы  $\gamma$ -квантов;  $\lambda_1, \lambda_2$  – постоянные распада;  $e_1, e_2$  – абсолютная эффективность спектрометра при энергиях  $\gamma$ -квантов  $E_1$  (первый нуклид) и  $E_2$  (второй нуклид);  $n_{12}$  – коэффициент ветвления, т.е. вероятность перехода материнского нуклида в дочерний.

Поправки  $k_{\mu}$ , учитывающие поглощение  $\gamma$ -квантов в материале экспериментального образца, определяются с учетом толщины и полного сечения взаимодействия  $\gamma$ -квантов данной энергии с материалом образца.

Поправки  $F_1$  и  $F_2$ , учитывающие распад продуктов реакций во время облучения с учетом амплитудной нестационарности протонных импульсов, определялись из данных о временной структуре цикла каждого облучения.

Плотность потока протонов и его погрешность определяются из выражений

$$\hat{\Phi} = \frac{R_{mon}^{22Na}}{S_{mon}^{22Na}}, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\hat{\Phi}}{\hat{\Phi}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_{mon}^{22Na}}{R_{mon}^{22Na}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{mon}^{22Na}}{S_{mon}^{22Na}}\right)^2}, \quad (9)$$

где  $R_{mon}^{22Na}$  – скорость образования  $^{22}\text{Na}$  в алюминиевом мониторе;  $S_{mon}^{22Na}$  – сечение реакции  $^{27}\text{Al}(p, x)^{22}\text{Na}$  при данной энергии протонов;  $\hat{\Phi}$  – средняя по площади, скважности и измеренным значениям амплитуд импульсов облучения плотность потока протонов.

Определив с использованием формул (4–7) скорости ядерных реакций в облученных образцах и с использованием формулы (8) – плотность потока протонов, при которой облучался образец, требуемое сечение образования данного продукта реакции и его погрешность вычисляются из выражений аналогичных (2) и (3).

Как показывает анализ, основной вклад в полную погрешность сечений вносят неопределенности значений ядерных данных – абсолютных квантовых выходов и сечений мониторных реакций, а также неопределенность эффективности регистрации спектрометра.

Используемые значения мониторной реакции, представленные в табл. 1, были определены на основании систематики функций возбуждения реакции  $^{27}\text{Al}(p, x)^{22}\text{Na}$ , полученных разными авторами (рис. 5).

**Глава 4** посвящена описанию техники эксперимента. Описывается ускоритель У-10 ИТЭФ и приводятся технические характеристики канала быстрого вывода протонов, который использовался для облучения образцов (рис.7).

Поскольку синхротрон ИТЭФ является кольцевой установкой, при ускорении энергия протонов измеряется с учетом одной из основных характеристик синхротрона, а именно неизменяемой длины замкнутой орбиты протонов, движущихся по кольцу. Точное измерение соответствующей ускоряющей радиочастоты обеспечивало точное определение энергии протонов. Потери энергии при транспортировке пучка протонов к месту облучения эксперимен-

тальных образцов учитывались путем введения поправок на взаимодействие протонов с конструктивными элементами транспортного канала и самими образцами. Расчет значений энергий протонных пучков при облучении «сэндвича» экспериментальный образец - монитор и используемые значения мониторной реакции  $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$  при вычисленных энергиях приведены в табл. 1. Расположение образцов и мониторов, закрепленных в центре алюминиевой пластины с размерами 72x72 мм и толщиной 0.1 мм, которая при облучении устанавливалась перпендикулярно пучку протонов, показано на рис. 8.

Основные рабочие характеристики спектрометров, используемых для измерений спектров  $\gamma$ -излучения облученных образцов, а именно: временная и температурная стабильности, эффекты каскадного суммирования, предельная загрузка спектрометра – приведены в диссертации. Абсолютная эффективность регистрации для различных высот и энергий, как наиболее важные характеристики, представлены на рис 9. Примеры измеренных  $\gamma$ -спектров облученных образцов из  $^{\text{nat}}\text{Ni}$   $^{93}\text{Nb}$  приведены на рис. 10 и 11.

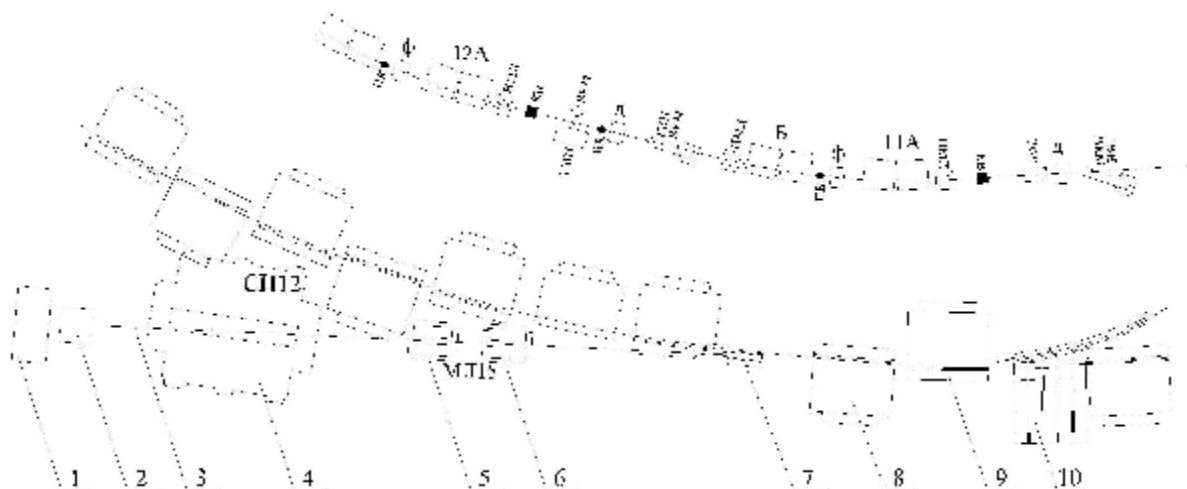


Рис. 7. Схема транспортного канала и элементы быстрого вывода протонного пучка (1 – подставка для размещения юстировочного столика и облучаемой мишени; 2 – токовый трансформатор; 3 – выходной фланец вакуумного протонопровода; 4 – поворотный магнит; 5 и 6 – дуплет квадрупольных линз, обеспечивающих фокусировку пучка; 7 – септум магнит; 8 и 9 – магнитные блоки ускоряющего кольца; 10 – кикер-магнит с углом отклонения 15 мрад)

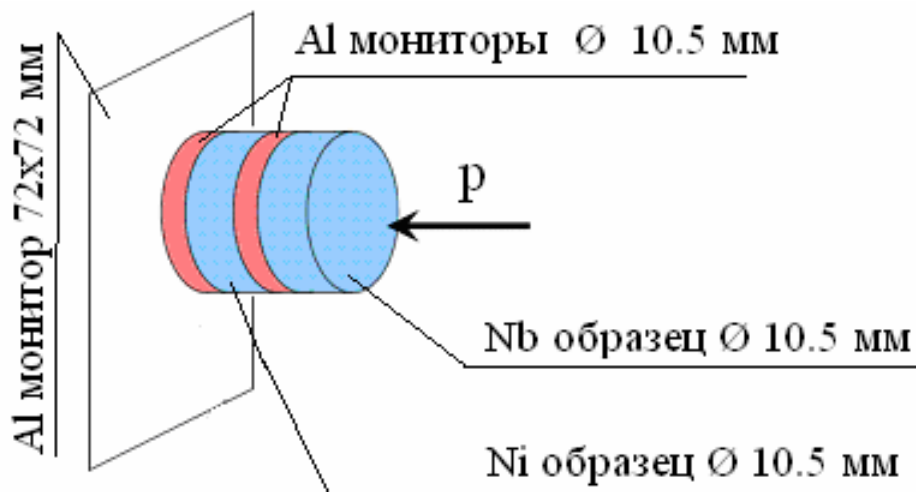


Рис. 8. Схема облучения образцов

Описано программное (SIGMA) и константное (PCNUDAT) обеспечение эксперимента, организация процесса измерений и обработки первичных экспериментальных результатов (GENIE2000). При идентификации РПП в ходе анализа измеренных  $\gamma$ -спектров процедура разделялась на три этапа:

1) сначала исключались  $\gamma$ -линии короткоживущих нуклидов (с периодами полураспада менее 5 минут), а  $\gamma$ -линии оставшихся, в соответствии с базой PCNUDAT, в пределах разрешающей способности спектрометра, объединялись в один массив (высокая разрешающая способность спектрометра существенно сокращает число  $\gamma$ -линий, входящих в него);

2) затем с использованием программы SIGMA определялось значение периода полураспада для этой  $\gamma$ -линии на основании всех последовательно измеренных спектров и сравнивалось с соответствующими значениями базы ядерных данных PCNUDAT;

3) и наконец, идентифицированный по энергии и периоду радионуклид анализировался на наличие и других  $\gamma$ -линий в соответствии с базой ядерных данных PCNUDAT.

На рис. 12 и 13 представлены примеры распадных кривых продуктов реакций в облученных образцах, которые, в соответствии с формулами (2–5), использовались для определения независимых и кумулятивных скоростей реакций материнских и дочерних ядер.

Т а б л и ц а 1. Значения энергий протонных пучков при облучении "сэндвича" экспериментальный образец – монитор с учетом ионизационных потерь на конструкционных элементах транспортного канала и значения мониторинговой реакции  $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$  при вычисленных энергиях.

Энергия (ГэВ)	Обр-1 Обр-2	Частота, МГц	$E_0$ , МэВ	Мембр Fe (мм)	Толщина воз-духа (мм)	dE мембр (МэВ)	dE возд (МэВ)	dE поллет 110мк	dE в Обр-1 (МэВ)	dE в Мон-1 (МэВ)	dE поллет 210мк	dE в Обр-2 (МэВ)	dE в Мон-2 (МэВ)	dE-tot Обр-1	dE-tot Мон-1	E-res Обр-1	E-res Мон-1	dE-tot Обр-2	dE-tot Мон-2	E-res Обр-2	E-res Мон-2	$^{22}\text{Na}$ Mon1	$^{22}\text{Na}$ Err Mon1	$^{22}\text{Na}$ Mon2	$^{22}\text{Na}$ Err Mon2
0.04	Nb-Ni	1.471	48.00	0.1	185	0.69	0.26	0.14	1.75	0.58	0.30	1.99	0.61	1.97	3.14	<b>46.0</b>	<b>44.9</b>	4.73	6.03	<b>43.3</b>	<b>42.0</b>	43.4	2.6	42.9	2.6
0.07	Nb-Ni	1.747	69.95	0.1	185	0.52	0.19	0.10	1.29	0.42	0.21	1.46	0.45	1.46	2.32	<b>68</b>	<b>67.6</b>	3.47	4.42	<b>66</b>	<b>65.5</b>	22.5	1.4	23.2	1.4
0.1	Nb-Ni	2.044	100.01	0.1	185	0.40	0.14	0.08	1.01	0.33	0.16	1.09	0.33	1.13	1.80	<b>99</b>	<b>98</b>	2.66	3.37	<b>97</b>	<b>97</b>	19.8	1.3	19.8	1.3
0.15	Nb-Ni	2.4187	150.06	0.1	185	0.30	0.11	0.06	0.76	0.24	0.11	0.83	0.12	0.85	1.35	<b>149</b>	<b>149</b>	2.00	2.48	<b>148</b>	<b>148</b>	17.1	1.1	17.1	1.1
0.25	Nb-Ni	2.929	250.01	0.1	185	0.22	0.08	0.04	0.55	0.18	0.08	0.60	0.18	0.61	0.98	<b>249</b>	<b>249</b>	1.45	1.83	<b>249</b>	<b>248</b>	15.0		0.9	
0.4	Nb-Ni	3.404	400.14	0.1	185	0.17	0.06	0.03	0.43	0.16	0.06	0.47	0.16	0.48	0.78	<b>400</b>	<b>399</b>	1.16	1.47	<b>399</b>	<b>399</b>	15.8		1.0	
0.6	Nb-Ni	3.783	600.30	0.1	185	0.15	0.05	0.03	0.37	0.14	0.05	0.40	0.14	0.41	0.66	<b>600</b>	<b>600</b>	0.98	1.25	<b>599</b>	<b>599</b>	16.0		1.0	
0.8	Nb-Ni	4.018	799.75	0.1	185	0.13	0.05	0.03	0.34	0.13	0.05	0.37	0.13	0.37	0.61	<b>799</b>	<b>799</b>	0.90	1.15	<b>799</b>	<b>799</b>	15.5		1.1	
1.2	Nb-Ni	4.289	1199.51	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.31	0.12	0.04	0.34	0.12	0.35	0.56	<b>1199</b>	<b>1199</b>	0.83	1.06	<b>1199</b>	<b>1198</b>	14.4		1.0	
1.6	Ni	4.435	1599.17	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.33	0.11	0.04	0.00	0.00	0.35	0.57	<b>1599</b>	<b>1599</b>	0.67	0.67	<b>1598</b>	<b>1598</b>	13.2		1.0	
1.6	Nb	4.435	1599.17	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.30	0.11	0.04	0.00	0.00	0.33	0.54	<b>1599</b>	<b>1599</b>	0.64	0.64	<b>1599</b>	<b>1599</b>				
2.6	Ni	4.603	2605.82	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.33	0.11	0.04	0.00	0.00	0.35	0.57	<b>2605</b>	<b>2605</b>	0.67	0.67	<b>2605</b>	<b>2605</b>	11.4		0.9	
2.6	Nb	4.603	2605.82	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.30	0.11	0.04	0.00	0.00	0.33	0.54	<b>2605</b>	<b>2605</b>	0.64	0.64	<b>2605</b>	<b>2605</b>				

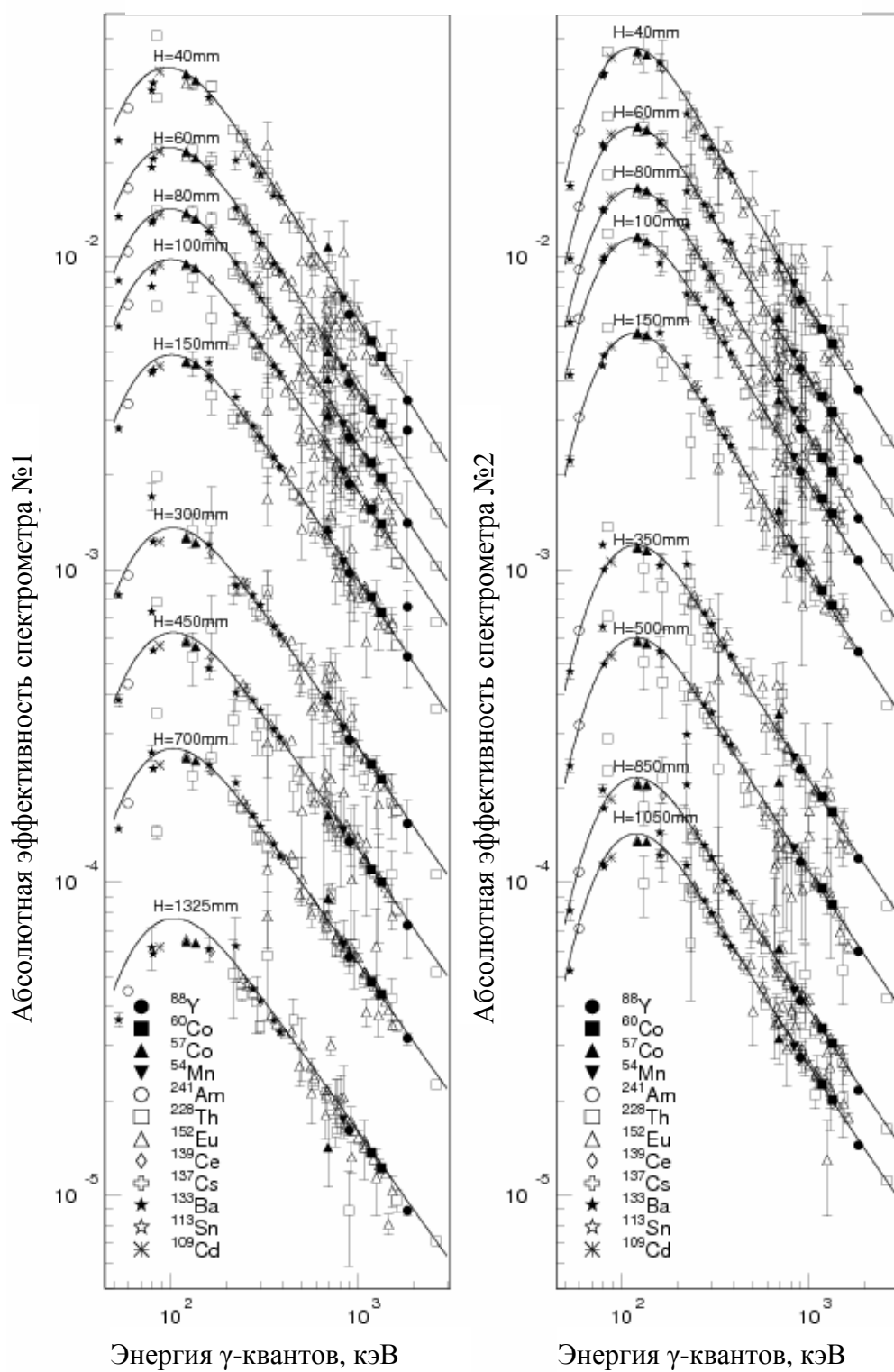


Рис. 9. Абсолютная эффективность регистрации спектрометра

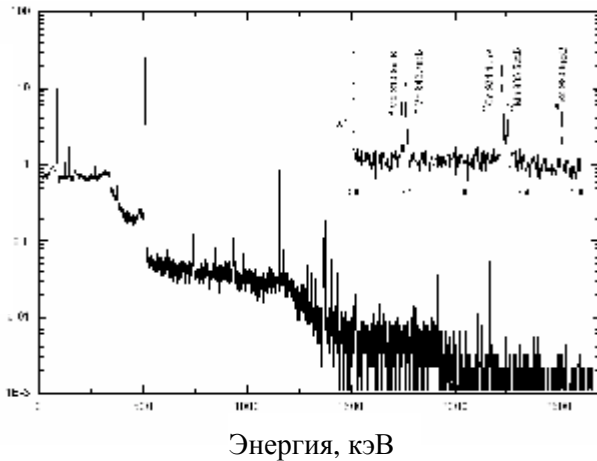


Рис. 10. Пример  $\gamma$ -спектра  $^{nat}\text{Ni}$  №05.  $E_p=2600$  МэВ. 1.47 ч после облучения. Продолжительность измерения 900 с

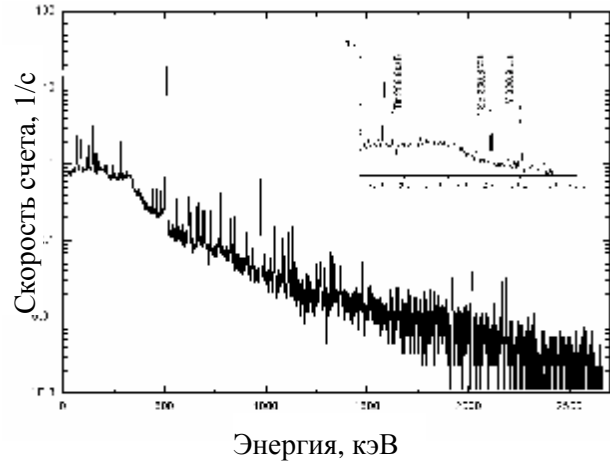


Рис. 11. Пример  $\gamma$ -спектра  $^{93}\text{Nb}$  №05.  $E_p=2600$  МэВ. 1.61 ч после облучения. Продолжительность измерения 900 с

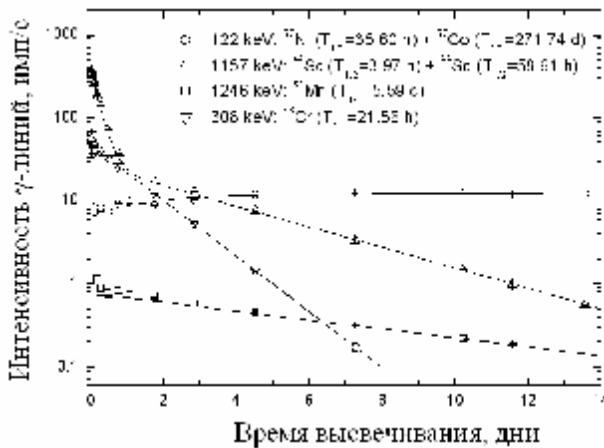


Рис. 12. Примеры распадных кривых продуктов реакции в  $^{nat}\text{Ni}$ , облученном протонами с энергией 2600 МэВ

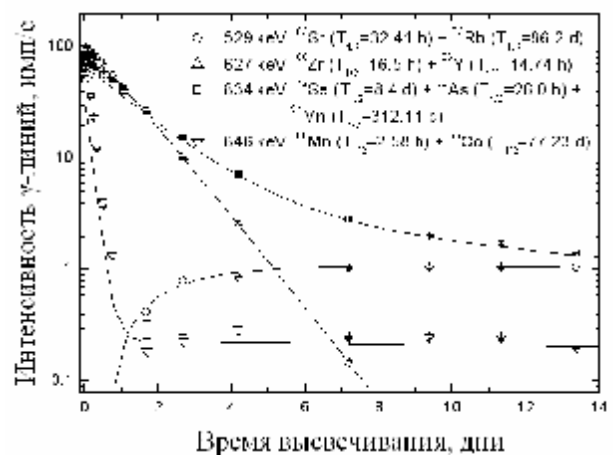


Рис. 13. Примеры распадных кривых продуктов реакции в  $^{93}\text{Nb}$ , облученном протонами с энергией 2600 МэВ

В **Главе 5** приведены результаты определения выходов РПР для исследуемых в настоящей работе протонных реакций. В проведенных экспериментах было определено 1112 (см. табл. 2) значений сечений образования радиоактивных продуктов реакций, из них 143 значения независимых (обозначение- $(i)$ ), 127 значений суммы выходов независимых метастабильного и основного состояний ( $i(\Sigma m_j + g)$ ), 137 значений независимых выходов метастабильного состояния ( $i(\Sigma m_j)$ ), 705 значений кумулятивных и супракумулятивных выходов ( $c, c^*$ ). Количество полученных сечений образования радиоактивных продук-

тов реакций каждого типа по всем энергиям подробно представлено в табл. 2.

Средняя точность определения скоростей реакций и сечений образования продуктов реакций составляет: для  $^{nat}\text{Ni}$  – 6.8 % и 11.4 % соответственно, для  $^{93}\text{Nb}$  – 11.2 % и 15.2 % соответственно (рис. 14 и 15). Точность определения плотности потока протонов при использовании метода мониторинговых реакций, как для  $^{nat}\text{Ni}$ , так и для  $^{93}\text{Nb}$ , находится в диапазоне от 6.9 % до 9.7 %.

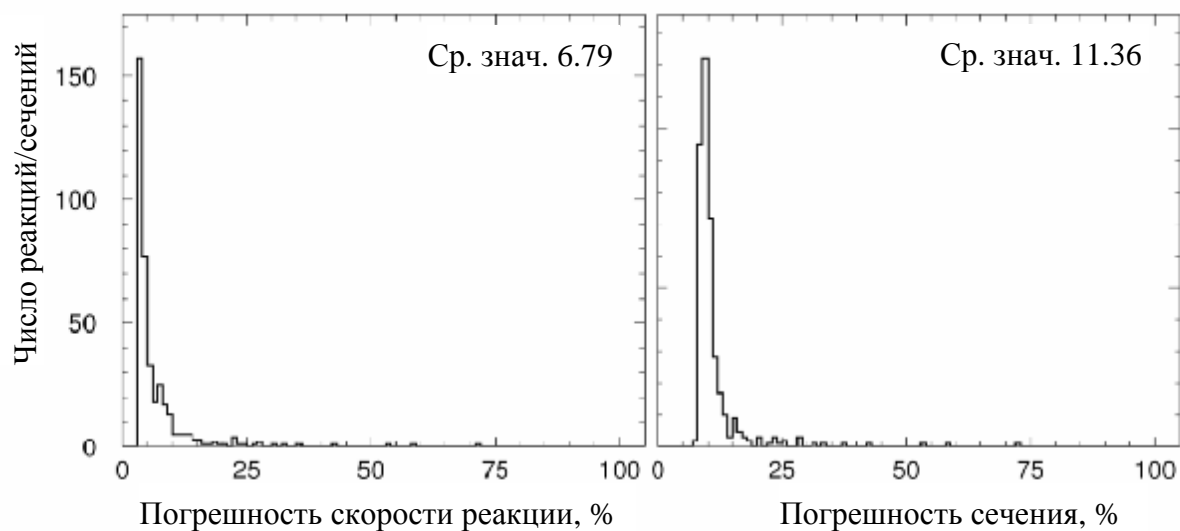


Рис. 14. Распределения погрешностей скоростей реакций и сечений  $^{nat}\text{Ni}$

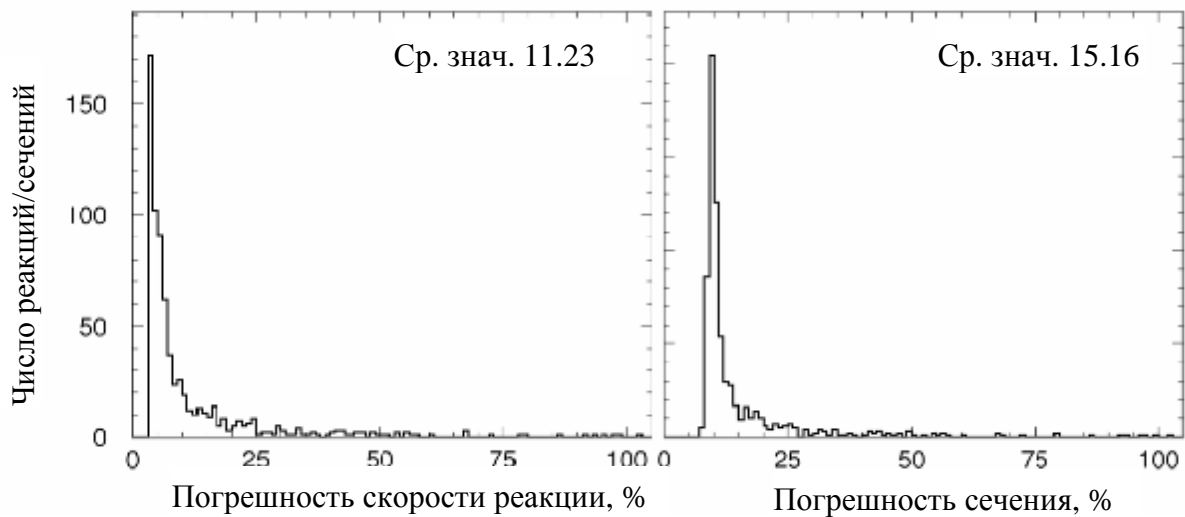


Рис. 15. Распределения погрешностей скоростей реакций и сечений  $^{93}\text{Nb}$

Т а б л и ц а 2. Общее количество измеренных выходов радиоактивных продуктов реакций различных типов по каждому эксперименту

Нуклид	Энергия, ГэВ	Тип выхода				Всего
		i	c+c*	i( $\Sigma m_i$ )	i( $\Sigma m_i+g$ )	
<sup>93</sup> Nb	0.04	2	10	4	3	19
	0.07	2	17	6	3	28
	0.1	2	22	9	4	37
	0.15	3	29	10	4	46
	0.25	5	37	10	6	58
	0.4	5	42	10	8	65
	0.6	6	50	11	9	76
	0.8	7	57	10	12	86
	1.2	8	64	12	12	96
	1.6	9	73	12	12	106
<sup>nat</sup> Ni	2.6	9	74	12	12	107
	0.04	4	13	1	2	20
	0.07	5	14	1	2	22
	0.1	6	15	2	4	27
	0.15	6	16	2	4	28
	0.25	10	20	3	4	37
	0.4	9	20	3	4	36
	0.6	9	24	3	4	40
	0.8	9	26	4	4	43
	1.2	9	26	4	4	43
1.6	9	28	4	5	46	
2.6	9	28	4	5	46	
<b>ВСЕГО</b>		<b>143</b>	<b>705</b>	<b>137</b>	<b>127</b>	<b>1112</b>

Полученные данные сравнивались с данными, полученными в ZSR (Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie, Hannover, табл. 3).

Результаты сравнения показывают, что число сечений РПП измеренных в ИТЭФ в ~ 1.5 – 4 раза превосходит число сечений измеренных в ZSR, что обусловлено возможностью измерения в ИТЭФ короткоживущих продуктов реакций. По этой причине полные составы измеренных продуктов реакций ( $N_0$ ), полученных в обеих лабораториях, несколько отличаются. В качестве критерия согласованности экспериментальных результатов ИТЭФ и ZSR использовался среднеквадратичный фактор отклонения  $\langle F \rangle$ , представленный формулой (12), в которой  $s_i^{calc}$  заменяется на  $s_i^{ZSR}$ , рассчитанный для общей выборки ( $N_i$ ).

Т а б л и ц а 3. Сравнение результатов ИТЭФ и ZRC для  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$ 

Энергия ИТЭФ, МэВ	Энергия ZSR, МэВ	$N_0/N_i/N_{3\sigma}$ ИТЭФ	$N_0/N_i/N_{3\sigma}$ ZSR	$\langle F \rangle$	Нук-лид	Тип	$\sigma_{\text{ИТЭФ}}$	$\sigma_{\text{ZSR}}$	$\langle F \rangle_{(3\sigma)}$
$^{nat}\text{Ni}$									
$43 \pm 1$	$43.3 \pm 0.4$	20/11/11	13/11/11	1.25	$^{52}\text{Mn}$	с	$0.631 \pm 0.051$	$1.160 \pm 0.063$	1.25
$66 \pm 1$	$67.3 \pm 0.6$	22/11/11	12/11/11	1.30	-	-	-	-	1.30
$97 \pm 1$	$97.5 \pm 1.7$ $90.1 \pm 0.7$	25/16/16	17/16/16	1.25	-	-	-	-	1.25
$148 \pm 1$	$148 \pm 1$	25/17/17	18/17/17	1.15	-	-	-	-	1.15
$599 \pm 2$	$600 \pm 0$	40/6/6	6/6/6	1.12	-	-	-	-	1.12
$799 \pm 2$	$800 \pm 0$	43/17/16	17/17/16	1.19	$^{58}\text{Co}$	i(m+g)	$16.9 \pm 1.5$	$9.4 \pm 1.2$	1.12
$1199 \pm 3$	$1200 \pm 1$	43/22/21	22/22/21	1.27	$^{58}\text{Co}$	i(m+g)	$18.4 \pm 1.7$	$10.3 \pm 1.3$	1.22
$1598 \pm 4$	$1600 \pm 1$	46/22/20	22/22/20	1.25	$^{60}\text{Co}$ $^{58}\text{Co}$	i(m+g) i(m+g)	$1.79 \pm 0.17$ $13.6 \pm 1.3$	$1.1 \pm 0.14$ $6.66 \pm 0.95$	1.13
$2605 \pm 8$	$2600 \pm 18$	46/22/21	22/22/21	1.45	$^{58}\text{Co}$	i(m+g)	$11.1 \pm 1.2$	$3.3 \pm 0.5$	1.31
$^{93}\text{Nb}$									
$46 \pm 1$	$44.1 \pm 1.5$	19/5/5	8/5/5	1.46	$^{87m}\text{Y}$ $^{87}\text{Y}$	с с*	$14.3 \pm 1.1$ $19.1 \pm 1.5$	$8.47 \pm 0.68$ $8.7 \pm 0.62$	1.15
$68 \pm 1$	$66.7 \pm 1.2$	28/10/10	12/11/11	1.38	-	-	-	-	1.38
$99 \pm 1$	$96.3 \pm 1.5$	37/9/9	11/9/9	1.20	-	-	-	-	1.20
$149 \pm 1$	$146 \pm 1.2$ $145 \pm 1.2$	46/13/13	15/13/13	1.15	-	-	-	-	1.15
$249 \pm 1$	$266 \pm 1$	58/16/13	17/16/13	1.33	$^{82}\text{Sr}$ $^{75}\text{Se}$ $^{74}\text{As}$	с с* i	$15.7 \pm 1.3$ $4.03 \pm 0.42$ $0.43 \pm 0.04$	$23.50 \pm 1.81$ $5.87 \pm 0.45$ $0.74 \pm 0.08$	1.27
$400 \pm 2$	$371 \pm 1$	65/20/20	23/20/20	1.18	-	-	-	-	1.18
$600 \pm 2$	$572 \pm 1$	76/26/26	30/26/26	1.13	-	-	-	-	1.13
$799 \pm 2$	$800 \pm 0$	86/19/19	19/19/19	1.20	-	-	-	-	1.20
$1199 \pm 3$	$1200 \pm 20$	96/33/33	35/33/33	1.15	-	-	-	-	1.15
$1599 \pm 4$	$1600 \pm 20$	106/32/32	34/32/32	1.11	-	-	-	-	1.11
$2605 \pm 8$	$2600 \pm 0$	107/25/24	25/25/24	1.64	$^{52}\text{Mn}$	с	$2.61 \pm 0.25$	$25.7 \pm 2.8$	1.21

Фактор рассчитывался как для общей совокупности данных ( $\langle F \rangle$ ), так и

для совокупности данных ( $N_{3\sigma}$ ), в которой значения, вышедшие за предел  $3\sigma$ , были отброшены ( $|s_1 - s_2| / \sqrt{\Delta s_1^2 + \Delta s_2^2} > 3$ , ( $\langle F_{3\sigma} \rangle$ ). Расхождение между данными ИТЭФ и ZSR в среднем на  $\sim 20\%$  показывает, что использование для верификации ядерных моделей данных ИТЭФ предпочтительнее, поскольку они количественно превосходят данные ZSR.

В **Главе 6** приведены результаты моделирования экспериментальных результатов с использованием различных ядерных моделей, в составе высокоэнергетических транспортных программ: MCNPX (BERTINI, ISABEL), SEM03.02, INCL4.2, INCL4.5, RHITS, CASCADE07. Краткие характеристики каждой из программ представлены в табл. 4.

Вычисления проводились при 25 значениях энергии протонов от 0.03 до 3.5 ГэВ с целью получения гладких функций возбуждения, распределений массовых выходов и статистик отношений расчетных сечений к экспериментальным. Для увеличения статистики сравнения с экспериментальными данными кроме независимых сечений использовались и кумулятивные. Метастабильные продукты реакций из сравнения исключались.

Ввиду отсутствия сложных переходов в изобарных цепочках измеренных продуктов реакций использовались линейные формулы расчета сечений кумулятивных реакций

$$s_n^{cum} = s_n^{ind} + \sum_{i=1}^{n-1} \left( s_i^{ind} \prod_{j=1}^{n-1} n_j \right), \quad (10)$$

$$s_n^{cum*} = s_n^{ind} + \frac{l_{n-1}}{l_{n-1} - l_n} n_{n-1} \times \left[ s_{n-1}^{ind} + \sum_{i=1}^{n-1} \left( s_i^{ind} \prod_{j=1}^{n-1} n_j \right) \right]. \quad (11)$$

Для количественной оценки сходимости полученных экспериментальных и расчетных данных использовался среднеквадратичный фактор отклонения  $\langle F \rangle$

$$F = 10 \left( \frac{1}{N_c} \cdot \sum_{i=1}^N \left[ \log(s_i^{ITEP}) - \log(s_i^{calc}) \right]^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

Т а б л и ц а 4. Характеристики программ

Название	Автор	Модели (INC/PE/Evap/Fis/Break-up(Fermi)/Coal)
BERTINI	Х. Бертини; ORNL	INC(Bertini)/MPEM (PE + Evap(Drener) + Fiss(RAL или Fong)) + Break-up (Fermi)+Coal
ISABEL	Я. Ярив, З. Френкель; Soreg NRC	INC(Isabel)/MPEM (PE + Evap(Drener) + Fiss(RAL или Fong)) + Break-up (Fermi)+Coal
INCL4.2, INCL4.5	Ж. Кюньён и др.; Liege К. Х. Шмидт и др.; GSI	INC(Liege)/Evap + Fis(ABLA) INC(Liege)/Evap +Fis(ABLA)/Break-up(Fermi)/Coal
CEM 03.02	С. Машник и др.; LANL	Усовершенствованный INC(Dubna)/PE/Evap+Fis (GEM)/Break-up(Fermi)/Coal
PHITS	Х. Иваси и др.; JAEA	INC( Bertini, JEM, Jet A.A.)/ Evap+Fis (GEM)
CASCA- DE07	В.С. Барашенков; Dubna Х. Кумават; BARC	INC(Dubna)/ Усовершенствованная Evap (Bohr-Wheeler)/ Усовершенствованная Fis(Fong)

Результаты вычислений фактора отклонения  $\langle F \rangle$  представлены в табл. 5. Для наглядного сравнения предсказательной способности программ результаты из табл. 5 представлены в виде гистограмм (рис. 16 и 18).

Кроме количественного сравнения полученных функций возбуждения в виде отношения расчетных и экспериментальных сечений в формуле среднеквадратичных факторов отклонения  $\langle F \rangle$ , представлено также и качественное (в виде графиков, рис. 17 и 19). На рис. 17 и 19 приведены наиболее характерные расчетные и экспериментальные функции возбуждения  $^{nat}\text{Ni}(p,x)$  и  $^{93}\text{Nb}(p,x)$  реакций. В полном объеме все измеренные функции возбуждения представлены в приложении к диссертации.

Качественные выводы, полученные при анализе одномерных диаграмм предсказательной способности программ, хорошо подтверждаются результатами вычислений средних факторов  $\langle F \rangle$ , полученных усреднением данных по всем 11 значениям энергии для  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$  (рис. 20). Результаты верификации используемых программ позволяют выделить 2 наилучшие программы – INCL4.5 и CEM03.02 и две наихудшие – CASCADE07 и INCL4.2.

Т а б л и ц а 5. Значения среднеквадратичного фактора отклонения  $\langle F \rangle$  для  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$

Модель	Образец	Энергия, МэВ											Среднее
		40	70	100	150	250	400	600	800	1200	1600	2600	
BERTINI	Ni	3.36	2.65	<b>3.48</b>	2.53	1.95	<b>1.71</b>	2.86	2.29	2.90	2.25	2.24	2.51
	Nb	2.28	2.42	1.68	<b>3.47</b>	2.58	2.17	3.06	<b>1.66</b>	1.78	2.24	2.05	2.25
ISABEL	Ni	<b>5.45</b>	3.64	4.14	2.7	2.21	<b>2.19</b>	3.62	4.15	2.90	2.25	2.24	3.05
	Nb	3.00	2.78	1.80	3.62	2.76	2.64	<b>4.65</b>	3.77	<b>1.78</b>	2.24	2.05	2.74
CEM03.02	Ni	2.26	<b>2.56</b>	2.37	<b>1.63</b>	1.75	1.67	1.69	1.70	1.89	1.86	2.40	1.96
	Nb	<b>3.36</b>	2.59	2.08	2.84	2.26	1.94	2.09	1.94	2.67	2.30	<b>1.92</b>	2.25
INCL4.2	Ni	2.01	2.08	<b>1.97</b>	2.52	3.44	<b>4.11</b>	2.28	3.41	3.01	3.48	2.92	2.95
	Nb	2.94	<b>2.02</b>	2.12	3.99	3.27	3.26	3.31	<b>4.90</b>	4.63	4.40	3.19	3.77
INCL4.5	Ni	<b>2.66</b>	1.62	1.59	<b>1.46</b>	1.09	1.57	1.56	1.59	1.54	1.64	1.85	1.71
	Nb	<b>13.78</b>	2.05	3.45	1.98	<b>1.55</b>	1.65	1.63	1.56	1.59	1.55	1.58	1.93
PHITS	Ni	3.68	2.95	<b>4.11</b>	3.16	2.45	2.05	2.12	1.96	<b>1.67</b>	1.74	1.76	2.35
	Nb	3.38	3.12	2.76	<b>4.35</b>	3.21	2.29	2.37	1.74	2.61	2.01	<b>1.66</b>	2.39
CASCAD E07	Ni	<b>5.19</b>	3.45	3.47	3.2	2.75	2.77	2.65	<b>2.6</b>	4.37	4.13	3.83	3.44
	Nb	<b>9.97</b>	4.73	4.33	3.37	2.65	2.61	2.87	<b>2.37</b>	2.73	3.69	3.01	3.19

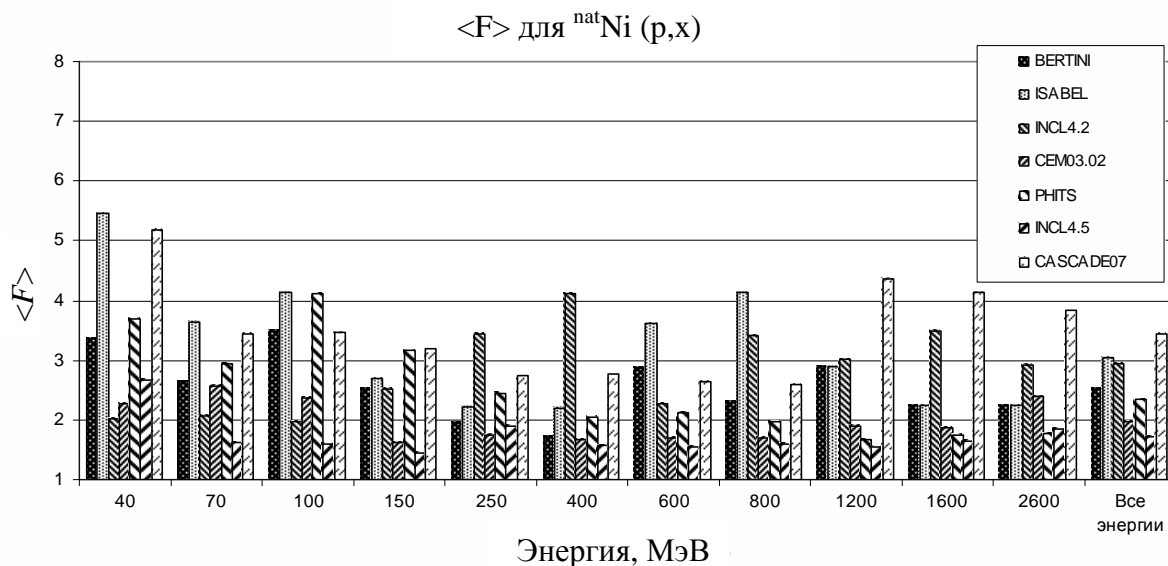


Рис. 16. Предсказательная способность программ BERTINI, ISABEL, INCL4.2, CEM03.02, PHITS, INCL4.5, CASCADE07 для  $^{nat}\text{Ni}$

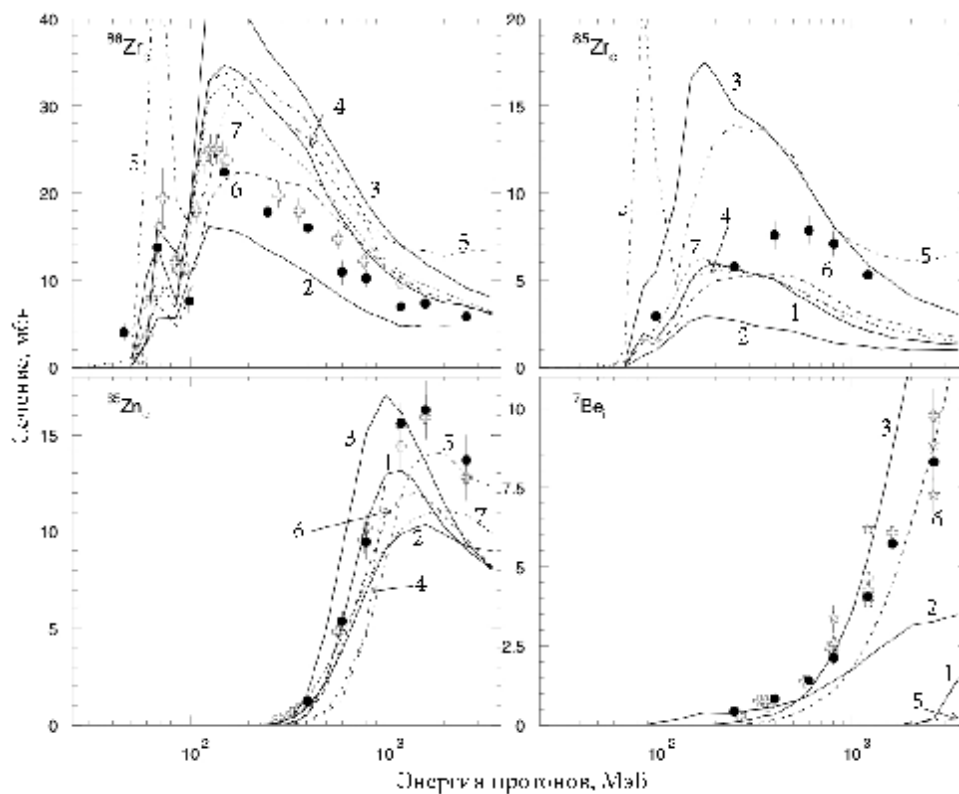


Рис. 17. Расчетные и экспериментальные сечения измеренных  $^{nat}\text{Ni}(p,x)$  реакций. Экспериментальные точки:  $\bullet$  – данная работа,  $\circ$  – работы GSI,  $\oplus$  – работы R.Michel,  $\diamond$  – работы M. Fassbender,  $*$  – работы других лабораторий. Расчеты: 1 – MCNPX(BERTINI), 2 – MCNPX(ISABEL), 3 – CEM03.02, 4 – INCL4.2, 5 – INCL4.5, 6 – CASCADE07, 7 – PHITS

$\langle F \rangle$  для  $^{93}\text{Nb}(p,x)$

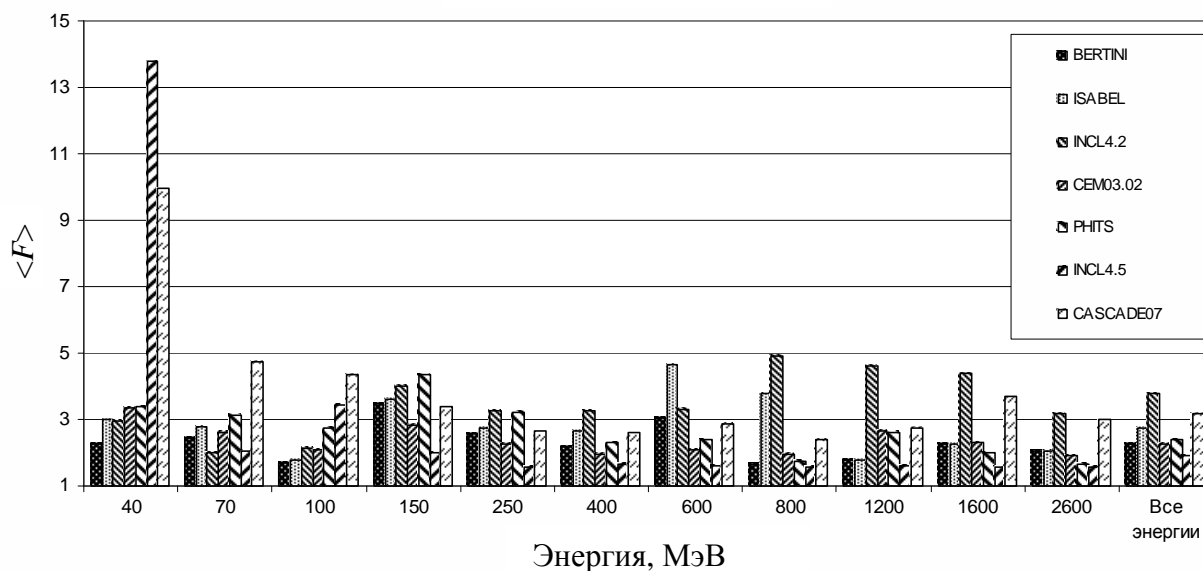


Рис. 18. Предсказательная способность программ BERTINI, ISABEL, INCL4.2, CEM03.02, PHITS, INCL4.5, CASCADE07 для  $^{93}\text{Nb}$

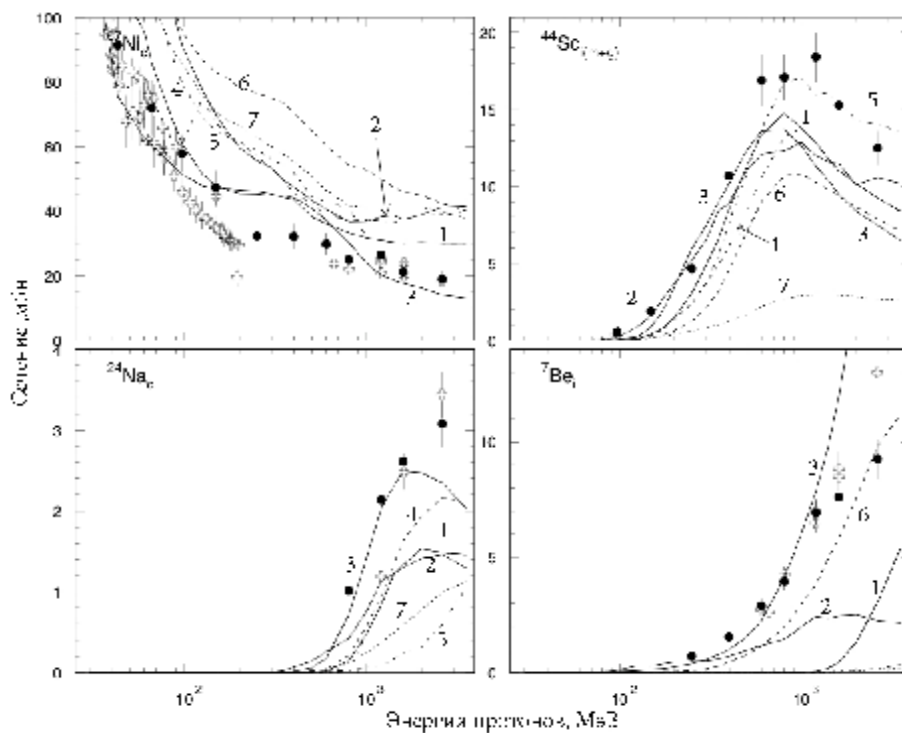


Рис. 19. Расчетные и экспериментальные сечения измеренных  $^{93}\text{Nb}(p,x)$  реакций. Экспериментальные точки: ● – данная работа, ○ – работы GSI, ⊕ – работы R.Michel, ◇ – работы M. Fassbender, \* – работы других лабораторий. Расчеты: 1 – MCNPX(BERTINI), 2 – MCNPX(ISABEL), 3 – CEM03.02, 4 – INCL4.2, 5 – INCL4.5, 6 – CASCADE07, 7 – PHITS

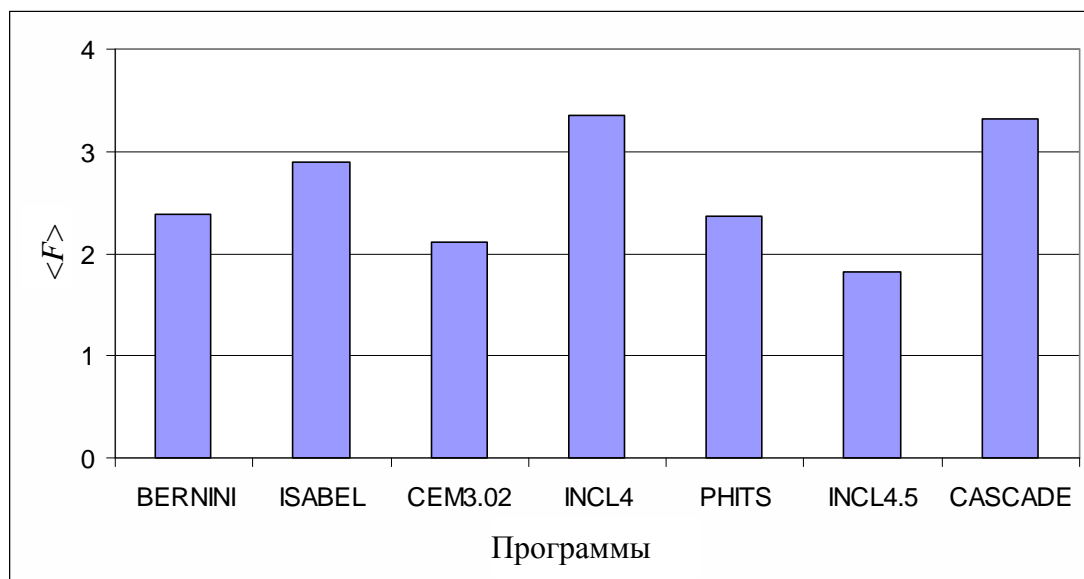


Рис. 20. Обобщенный рейтинг программ BERTINI, ISABEL, INCL4.2, CEM03.02, PHITS, INCL4.5, CASCADE07, полученный из данных для  $^{\text{nat}}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

- 1) обоснован список материалов, которые могут быть использованы в перспективных подкритических технологиях;
- 2) систематизированы имеющиеся к настоящему времени сведения о сечениях образования радиоактивных продуктов  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$  при их взаимодействии с протонами промежуточных и высоких энергий;
- 3) изготовлено и облучено 11 сборок из  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{27}\text{Al}$ , 11 сборок из  $^{93}\text{Nb}$  и  $^{27}\text{Al}$ ; при энергиях протонов 40, 70, 100, 150, 250, 400, 600, 800, 1200, 1600 и 2600 МэВ;
- 4) определено 388 значений сечений образования радиоактивных продуктов реакций для  $^{nat}\text{Ni}$  ( $i = 85$ ,  $i(m+g) = 42$ ,  $i(m) = 31$ ,  $c+c^* = 230$ ) и 724 значения – для  $^{93}\text{Nb}$  ( $i = 58$ ,  $i(m+g) = 85$ ,  $i(m) = 106$ ,  $c+c^* = 475$ ). На основе этих данных получено 47 функций возбуждения для  $^{nat}\text{Ni}$  и 108 – для  $^{93}\text{Nb}$ , из них впервые измерено 9 функций возбуждения и 24 для  $^{nat}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Nb}$ , соответственно.
- 5) систематизированы и обработаны данные по облучению мониторов в 92 экспериментах по облучению  $^{nat}\text{W}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{nat}\text{Ni}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{nat}\text{Cr}$  при энергиях 40.8, 44.6, 66.0, 97.2, 147.6, 249, 400, 600, 799, 1199, 1598 и 2605 МэВ и получены функции возбуждения для трех мониторных реакций  $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(p,x)^7\text{Be}$ ;
- 6) экспериментальные данные промоделированы с использованием семи программ. Для качественного сравнения построены функции возбуждения для 47 ядерных реакций  $^{nat}\text{Ni}$  и 108 для  $^{93}\text{Nb}$ ; для количественной оценки, выполнены расчеты фактора  $\langle F \rangle$  при энергиях протонов 40, 70, 100, 150, 250, 400, 600, 800, 1200, 1600 и 2600 МэВ;
- 7) сравнение расчетов с экспериментальными данными показывает, что значения фактора  $\langle F \rangle$  лежат в диапазоне от 1.2 до 13.8 для различных программ. Эти значения соответствуют отклонению расчетов от эксперимента от 20 % до 1280 %;
- 8) выполненные оценки позволили установить, что даже для наиболее совершенных программ отклонение превышает требуемую точность 30 %, расхождения особенно велики в области низких энергий. Таким образом, все программы на основе модели внутриядерного каскада нуждаются в дальнейшем развитии.

**Личное участие автора.** Автор принимал непосредственное участие в качестве полноправного участника научной группы в исследованиях, описанных в диссертации, на всех этапах их выполнения: анализе литературных данных, развитии экспериментальной методики, определении сечений образования радиоактивных продуктов реакций, оптимизации режимов облучения, подготовке и облучении образцов, анализе мониторинговых реакций, измерении  $\gamma$ -спектров облученных образцов и их обработке, получении и вычислении значений сечений, интерпретации полученных результатов. Определение номенклатуры исследуемых материалов и энергий налетающих протонов, а также сравнение экспериментальных и расчетных результатов были проведены автором совместно с научным руководителем.

**Апробация работы.** Результаты работы лично докладывались автором на:

1. научных сессиях-конференциях секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", декабрь 2005 года, ноябрь 2007 года;
2. международной конференции "NUFRA2007-International Conference on Nuclear Fragmentation", Antalya (Kemer), September 24-October 1, 2007;
3. рабочей встрече участников Координационного Исследовательского Проекта "Анализ Моделей и Программ", Париж, СЕА, Saclay, февраль 2010;
4. научных сессиях НИЯУ МИФИ-2010, -2011, Обнинск, январь 2010, февраль 2011.

#### **Публикации автора по теме диссертации**

1. Титаренко Ю. Е., Боровлев С. П., Павлов К. В. и др. Сечения мониторинговых реакций  $^{27}\text{Al}(p, x)^{24}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(p, x)^{22}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(p, x)^7\text{Be}$ . Ядерная физика, 2011, том 74, №4, с.531-547.
2. Титаренко Ю. Е., Батяев В. Ф., Павлов К. В. и др. Измерение и моделирование сечений образования продуктов реакций при облучении  $^{93}\text{Nb}$  и  $^{\text{nat}}\text{Ni}$  протонами энергиями 0.04–2.6 ГэВ. Ядерная физика, 2011, том 74, №4, с.561-573.
3. Титаренко Ю. Е., Батяев В. Ф., Павлов К. В. и др. Образование остаточных радиоактивных ядер-продуктов в тонких мишенях из  $^{209}\text{Bi}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,

$^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ , облучаемых протонами с энергиями от 0.04 до 2.6 ГэВ. Ядерная физика, 2007, том 70, №7, с. 1188-1192.

4. Titarenko Yu., Batyaev V., Pavlov K. et al. Nuclear data requirements for accelerator-driven systems. NUFRA2007-International Conference on Nuclear Fragmentation”, Antalya (Kemer), September 24-October 1, 2007, <http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2007/talks/titarenko.pdf>.

5. Titarenko Yu., Konev V., Pavlov K. et al. Nuclear Data to substantiate the high-promising and facilities and to verify the nuclear models and codes used to predict their nuclear-physics parameters and operational data. Int.EU-Russia/CIS Conference on technologies of the future. Spain-ISTC/STCU cooperation, Madrid, 22-23 April 2010, p. 73.

6. Титаренко Ю. Е., Батяев В. Ф., Павлов К. В. и др. К вопросу об измерениях параметров пучков протонов и ионов, создаваемых на ускорительно-накопительном комплексе ТВН ИТЭФ. Тезисы докладов IV конференции по метрологическому обеспечению измерений в Росатоме. Сочи, 04 – 08 октября, 2010, с. 56-58.

7. Титаренко Ю. Е., Батяев В. Ф., Павлов К. В. и др. Измерение сечений образования радиоактивных продуктов энергией 0.04–2.6 ГэВ с  $^{93}\text{Nb}$  и  $^{\text{nat}}\text{Ni}$ . Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, Аннотации докладов, М., 2010, т.1, с. 229.

8. Титаренко Ю. Е., Батяев В. Ф., Павлов К. В. и др. Верификация ядерных моделей в составе высокоэнергетических транспортных программ, с использованием сечений остаточных ядер продуктов протонных реакций в мишенях из  $^{209}\text{Bi}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Pb}$ ,  $^{\text{nat}}\text{W}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ni}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Cr}$ , измеренных в ИТЭФ. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011, Аннотации докладов, М., 2011, т.1, с. 209.