

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**АНОМАЛЬНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ
В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ ("ХОЛОДНЫЙ СИНТЕЗ"):
ВОПРОСЫ ВСЕ ЕЩЕ ОСТАЮТСЯ***В.А. Царев*

(Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	63
2. Нейтронные измерения	68
2.1. Эксперименты группы К. Вольфа (Техасский университет) по регистрации быстрых нейтронов при электролизе D_2O . 2.2. Эксперименты по регистрации медленных нейтронов групп Лос-Аламосской национальной лаборатории и Объединенного института ядерных исследований. 2.3. Эксперименты по регистрации быстрых и медленных нейтронов. 2.4. Американско-японский эксперимент на подземном черенковском детекторе Камиоканде.	
3. Т р и т и й	79
3.1. Эксперименты группы Лос-Аламосской национальной лаборатории по регистрации трития в Pd-Si-D₂-ячейке . 3.2. Эксперименты по регистрации Т при электролизе D_2O группой Техасского университета.	
4. Регистрация 4He	54
5. Теоретические модели НТС	88
6. Заключение	90
Примечание	91
Список литературы	91

1. Введение

После непродолжительного периода всеобщего интереса к "холодному" (или "низкотемпературному" — НТС) ядерному синтезу (см., например, [1]) широко распространилось убеждение, что он "умер". Подобное суждение высказывается обычно достаточно категорично, при этом зачастую даже людьми, непосредственно не знакомыми с работами по НТС. Это — "научное общественное мнение". Между тем, материалы недавних конференций по НТС^(1*) показывают, что ситуация здесь далеко не столь очевидна и "слухи о кончине" НТС, по-видимому, явно преувеличены или, во всяком случае, преждевременны.

Негативное отношение к НТС возникло прежде всего как реакция на большое число поспешных, непрофессионально сделанных экспериментов начального периода. Масштаб интереса к НТС отразил восприимчивость нашего

общества к научным идеям и широкое развитие средств телекоммуникации. Исключительная простота экспериментов по НТС (резко контрастировавшая с невероятной сложностью и дороговизной термоядерных исследований) стимулировала быстрое вовлечение специалистов различных профилей и открывала возможность участия в работах малых групп и даже энтузиастов-одиночек, располагавших только простейшим физическим и химическим оборудованием. Результат: ажиотаж, поспешность и очень неоднородный состав участников этой "гонки за холодным синтезом", далеко не все из которых обладали необходимой подготовкой и чувством ответственности. Возник беспрецедентный по масштабу "шумовой эффект", из которого очень трудно было выделить "полезный сигнал", содержащийся в добротных экспериментах. Это был тот случай, когда "количество не перешло в качество", поскольку большинство работ оказалось бездоказательным, независимо от того, положительный или отрицательный вывод делали сами авторы.

Другая причина связана с трудностью воспроизведения результатов экспериментов, что "воспринималось большинством как свидетельство плохого качества опытов, а не свойства явления в тех условиях, в которых оно изучалось. При этом общепризнано, что все, что невоспроизводимо и неповторимо, противоречит духу науки" [2]. В действительности, эксперименты по НТС оказались в высшей степени нетривиальными, а сигналы спорадическими и близкими к фоновому уровню. Хотя множество групп в отдельных измерениях получало положительные результаты, не удавалось выявить условия и параметры, контролирующие их получение.

Все это привело к тому, что широкая общественность перестала верить в НТС и потеряла к нему интерес. Лишенное корысти немедленного практического применения, занятие НТС приобрело значительно более спокойный и деловой характер, более адекватный научным исследованиям. Впрочем, под этим внешним покровом спокойствия продолжают кипеть страсти, которые время от времени выплескиваются на страницы прессы. Вот лишь некоторые недавние высказывания противников и сторонников НТС, которые дают представление о характере полемики (цитируются по [3]).

Доктор Роберт Парк, исполнительный директор Американского Физического общества, в газете "Вашингтон Пост" от 15 мая 1991 г.: "... История с холодным синтезом определялась не столько ошибочной наукой, сколько такими общечеловеческими слабостями, как алчность, амбиции, тщеславие... Нет сомнения, что среди последователей холодного синтеза имеются истинные верующие, точно так же, как имеются искренние ученые, которые верят в психокинез, летающие блюдца, сотворение мира и т.п.. Научная степень еще не означает прививку против тупости и лживости".

Доктор Рональд Паркер, глава Центра плазменного синтеза Массачусетского Технологического института, в интервью газете "Бостон Геральд": "... Сейчас вопрос уже не в том, что они (первооткрыватели НТС Флейшман и Понс) неверно истолковали свой опыт..., сколько в том, не было ли это предна-

меренным мошенничеством".

Адмирал Джеймс Уоткинс, глава департамента энергетики США, выступая 6 мая 1991 г. на Ассоциации издателей американских газет: "Помните холодный синтез? Новости на первых страницах... Что это — ключ к нашей энергетической свободе или раздутая мистификация? В конце концов это оказалось ни тем и ни другим. Просто плохая наука... Однако при этом был нанесен значительный урон. Благодаря этим двум членам научного сообщества теперь всякий человек, одетый в белый лабораторный халат, выглядит мошенником...".

Следует признать, что оснований для такой суровой критики более чем достаточно. Здесь и многие экспериментальные работы, в которых преувеличена точность измерений и надежность аппаратуры, и теоретические модели, противоречащие хорошо установленным законам природы и не выдерживающие элементарной проверки. Все это, естественно, вызывает раздражение.

Не менее категоричны в своих высказываниях и крайние энтузиасты НТС. Они, как правило, склонны признавать полностью достоверными все экспериментальные результаты, а критику рассматривают как следствие "заговора научной мафии", которая защищает миллиарды, выделенные на исследования по традиционному термояду. Вот лишь некоторые образчики.

Кэрл Уайт в статье "Революция холодного синтеза" в журнале "21-й век": "Холодный синтез, вероятно, является наиболее важным открытием этой половины нашего века, и конференция (в Комо) подтвердила это... 200 мужчин и женщин, прибывших на конференцию, выразили решимость бороться за правду, какой они ее видят, независимо от цены для своего материального положения или репутации. Они отказались капитулировать перед тиранией организаций, подобных Американскому Физическому обществу, журналов типа "Нейчур", или лживых журналистов, которые пишут для популярной прессы".

Профессор Роберт Буш из Калифорнийского Государственного политехнического университета: "Конференция стала сигналом успеха... Общее мнение — исследования по холодному синтезу не только не прекратились, но продолжают и укрепляются".

Доктор Гейнц Геришер, в недавнем прошлом директор Института Макса Планка, говоря о заявлениях относительно преобладания трития над нейтронами в опытах по НТС: "Если эти величины верны, если революция в ядерной теории должна скомбинировать теорию твердого тела с ядерными силами, мы имеем фантастическое новое открытие". (С этим нельзя не согласиться, однако вопрос как раз в том и состоит — верны ли экспериментальные данные!) Порой полемика напоминает религиозные войны, когда прежде всего важна победа веры, а не выяснение истины. Впрочем, этому не следует особенно удивляться. В обстановке, когда отсутствует надежная наблюдательная основа, многие суждения об НТС базируются скорее на интуиции, чем на фактах. Подобное положение вполне характерно для начального периода исследований нового явления и рано или поздно разрешается подтверждением или опровержением реальности этого явления. Можно привести множество примеров. Вспомнить также,

какие, порой весьма экзотические, объекты вводятся, например, в физике элементарных частиц: "тахiony", "максимоны", "вимпы", "чампы", "кентавры" и т.п. Со временем некоторые из предположений подтверждаются экспериментом. Блестящие примеры последнего времени — кварки, промежуточные бозоны. Большинство других гипотез отвергается. Это нормальный ход исследований. Если же пытаться классифицировать различные подходы на основе надуманных философских концепций [4], то к разряду "патологических" можно легко отнести многие направления современной науки, поскольку ошибки и сомнения неизбежны при исследовании новой области. Поспешные и категоричные негативные суждения столь же опасны, как и положительные. Классическим примером может служить оценка перспектив метода Лагранжа — Гамильтона в теории элементарных частиц, данная на конференции в Киеве в 1959 г. крупнейшим советским теоретиком Л.Д. Ландау, который заявил, что лагранжиан "мертв и должен быть похоронен со всеми подобающими ему почестями". Прошло несколько лет, и выдающиеся успехи в теории элементарных частиц были достигнуты именно на основе лагранжева метода.

Исследования по НТС все еще находятся в стадии, когда преждевременно делать окончательные выводы. Более разумно обратиться к экспериментальным данным, полученным за последнее время, попытаться оценить степень их достоверности и посмотреть, чему они нас учат.

За три года, прошедших после первых сообщений по НТС, экспериментальная техника, используемая в этих исследованиях, значительно усовершенствовалась. Повысилась эффективность детекторов: (от 10^{-5} в первых опытах до 30—45% в более поздних), улучшилась их надежность и помехозащищенность.

Наблюдения, которые приводятся как свидетельства в пользу НТС, можно разделить на три группы:

а) *Данные по "прямой" регистрации продуктов ядерных реакций dd-синтеза.* В основном это нейтроны из реакции



(данные по заряженным частицам более скудны и противоречивы). Метод обладает наибольшей чувствительностью и позволяет регистрировать события на уровне $10^{-2}—10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (так называемый "уровень Джонса"), соответствующем скорости реакции

$$\Lambda \sim 10^{-22 \pm 1} \text{ с}^{-1} (dd)^{-1}.$$

б) *Результаты радиохимических и масс-спектрометрических измерений содержания трития и гелия из реакций*



в образцах или газах. Чувствительность этого метода на много порядков ($\sim 10^{-9}$) ниже, чем нейтронного. Достоинствами является относительная простота и возможность накопления T (или He) в длительном эксперименте. Наиболее поразительный результат, сообщаемый некоторыми группами, — преобладание

T (и ${}^4\text{He}$) над нейтронами, в отличие от ожидаемого соотношения $T/n \approx 1$.

в) *Указание на избыточное тепловыделение ΔQ* (по сравнению с энергией Q , затраченной на насыщение образцов дейтерием). Этот метод наименее чувствителен. Если за тепло ответственны известные ядерные реакции dd-синтеза (1)—(3), то избыточное энерговыделение на уровне 1 Вт соответствует $2 \cdot 10^{12}$ и $2,7 \cdot 10^{11}$ реакций в секунду по каналам (1), (2) и (3) соответственно. Если тепловыделение велико и превосходит все известные источники энерговыделения неядерной природы, этот метод регистрации НТС наиболее прямой и простой.

Статус наблюдений а), б) и в) различен. Наибольшая острота связана с измерениями избыточного тепловыделения. Несколько групп продолжают сообщать о положительных результатах по $\Delta Q/Q$, достигающих от нескольких процентов до тысяч процентов. Если бы эти результаты были верны, то очевидно, что мы имели бы дело с совершенно новой физикой и перспективами энергетических приложений. Однако именно эти результаты вызывают наибольшие сомнения и возражения. Поскольку они до сих пор не прошли широкой проверки, представляется разумным подождать новых, более однозначных данных. Поэтому мы не будем здесь обсуждать калориметрические эксперименты.

Наблюдение нейтронной эмиссии даже на очень низком "уровне Джонса", безусловно, очень интересно и неожиданно. Оно превосходит примерно на 40 порядков скорость синтеза дейтерия в "естественном" состоянии — в молекуле D_2 . Однако, как будет показано ниже в разделе 5, такая скорость, хотя и требует реализации весьма нетривиальных условий, все же, по-видимому, может быть понята на основе известных представлений ядерной физики и физики твердого тела [1]. Практические приложения здесь пока не видны. Вместе с тем даже при такой малой скорости явление могло бы иметь важные следствия для глобальных геофизических и космологических масштабов. В целом возможность НТС на таком уровне не вызывает особых возражений.

Иначе обстоит дело с заявлениями о преобладающем образовании в НТС трития ($T/n \sim 10^9$) или He. Хотя и в этом случае энергетика еще не очевидна, вполне возможны другие практические приложения (например, наработка T). Вместе с тем нарушение соотношения $T/n \approx 1$, безусловно, явилось бы сигналом о новых физических явлениях. Это же относится к преобладанию канала с выходом ${}^4\text{He}$, который в свободном состоянии (реакция (3)) подавлен по отношению к каналам (1) и (2) на несколько порядков.

Цель настоящего обзора — обсудить результаты экспериментов, выполненных в последнее время по регистрации ядерных продуктов n, T и ${}^4\text{He}$, которые мало известны широким научным кругам. На конференциях и совещаниях, прошедших в минувшем 1991 г., были представлены обширные новые данные по регистрации нейтронов. Нет возможности, да и нужды, приводить их все. Мы ограничимся лишь несколькими избранными работами, которые, на наш взгляд, обладают высокой надежностью и достоверностью. Будут рассмотрены также недавние работы по регистрации трития и гелия.

В последнем разделе кратко суммируются результаты анализа некоторых популярных теоретических моделей НТС.

2. Нейтронные измерения

Несмотря на известные трудности детектирования нейтронов, этот метод регистрации НТС обеспечивает наибольшую чувствительность благодаря высокой проникающей способности нейтронов. Высокоэффективные нейтронные детекторы, созданные в последние годы, позволяют в условиях низкофоновых экспериментов регистрировать эмиссию нейтронов на уровне нескольких событий в сутки.

Особенности нейтронных измерений в НТС проанализированы в [5]. Ключевые параметры нейтронных детекторов: эффективность, разрешение по энергии, временная информация, чувствительность к гамма-фону и фону от космических лучей, шумовая восприимчивость.

Основные методы регистрации 2,45-мэВных нейтронов, ожидаемых от dd-синтеза: регистрация быстрых нейтронов по протонам отдачи, термолизация и последующая регистрация медленных нейтронов, комбинация этих методов ("быстро-медленный" вариант).

Преимущества регистрации быстрых нейтронов: возможность измерения энергии нейтронов, быстрая временная информация, более низкий нейтронный фон (основная часть фоновых нейтронов — медленные). Преимущества детектирования медленных нейтронов: высокая эффективность, простота обращения, низкая чувствительность к гамма-фону, способность к регистрации "вспышек".

Быстро-медленный вариант позволяет наиболее эффективно подавить фон.

В табл. I—III из [5] приведены основные особенности детекторов различного типа, возможные источники помех и ложных сигналов и способы защиты от шумов.

Таблица I. Нейтронные детекторы, используемые в исследованиях НТС [5]

Тип	Энергия нейтронов	Реакция	Типичная эффективность, %	Чувствительность к γ -квантам
Счетчики на ^3He	Тепловые	$^3\text{He}(n,p)$	1—44	Нет
Счетчики на BF_3	»	$^{10}\text{B}(n,\alpha)$	0,5—20	»
$\text{H}_2\text{O} + \text{NaI/Ge}$	»	$\text{H}(n,\gamma)$	0,1	»
Активированные фольги	»	(n,γ) или (n, F)	0,1—5	»
Li-стекло	»	$^6\text{Li}(n,\alpha)$	1—20	»
Жидкие сцинтилляторы	Быстрые	n,p -отдача	1—25	Да
Пластические сцинтилляторы	»	n,p -отдача	1—20	»
Комбинация	Быстрые/тепловые	$(n,p) + (n,\alpha)$	10—25	Да/нет
Черенковские детекторы	Тепловые	$(n,\gamma) + e$	15—20	Высокой энергии

Таблица II. Потенциальные источники ложных сигналов [5]

а) *Электрические помехи*

1. Утечки высоковольтного напряжения (герметизация от влажности)
2. Электромагнитные наводки (экранирование)
3. Помехи в силовых линиях (фильтры, счетчики вето и т.п.)
4. Микрофонный эффект

б) *Фон космических лучей*

1. Полный счет (взаимодействие космических лучей в защите)
2. Совпадательный счет (вспышки в детекторе и защите)
3. Реакции в D_2 в мишени

в) *Лабораторный нейтронный фон*

1. Ускорители и реакторы
2. Радиоактивные источники
3. Естественная радиоактивность (уран, радон)

Таблица III. Защита против ложных сигналов [5]

1. Защита от электромагнитных наводок линий передачи сигналов и высоковольтных линий
2. Герметичность высоковольтных компонент
3. Фильтры в силовых линиях
4. Множественная независимая сегментация детекторов
5. Два (или более) различных детекторов
6. Энергетический спектр нейтронов
7. Время прихода импульса (замедление)
8. Внешние детекторы "вето"
9. Вариация расстояний до детекторов
10. Анализ формы импульса
11. Защита от космических лучей (подземные лаборатории)
12. Тщательные контрольные опыты

Рассмотрим теперь результаты некоторых недавних работ, выполненных с помощью различной техники и обладающих высокой достоверностью.

2.1. Эксперименты группы К. Вольфа (Техасский университет) по регистрации быстрых нейтронов при электролизе D_2O [6]. Детектор (рис. 1) выполнен на основе жидкого сцинтиллятора (NE 213), просматриваемого фотоумножителем. Разрешение по энергии не очень высокое, но позволяет выделить интересующую область энергий и, таким образом, понизить фон. Чувствительность к γ -квантам подавлена за счет разделения по форме импульса, так что фон γ составляет менее 10% полного фона. Фон космических лучей подавлен антисовпадательной защитой (пластический сцинтиллятор, просматриваемый ФЭУ) и слоем парафина (25 см). Нейтронная компонента космических лучей составляет основной фон.

В первых экспериментах использовались два идентичных детектора, в более поздних — четыре.

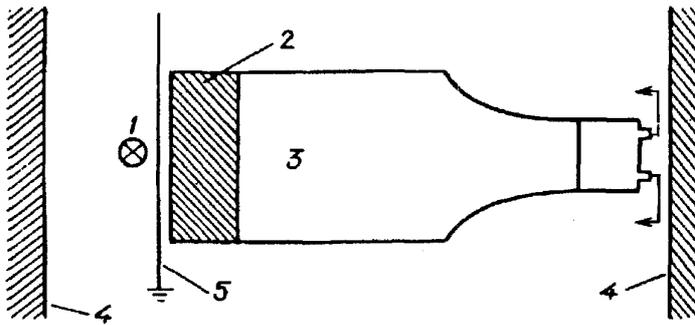


Рис. 1. Нейтронный счетчик [6].
1 — ячейка, 2 — жидкий сцинтиллятор NE 213, 3 — фотоумножитель, 4 — парафин, 5 — стальная пластина

Усредненный фон составлял 0,5—0,8 событий/мин. Наблюдалась заметная вариация фона с периодом около 1 ч, которая приблизительно удваивала величину стандартного отклонения. Одновременное мониторирование фона эквивалентным детектором, расположенным на расстоянии 30 см от основного (и отделенного 5 см парафина) позволяло уменьшить фон. Для контроля рабочий и фоновый детектор периодически менялись местами. Для оценки возможного фона от радиоактивности (реакции $\alpha \rightarrow n$ в ячейке) материалы, используемые в аппаратуре, исследовались до и после эксперимента с помощью кремниевых и германиевых детекторов.

Результаты серии экспериментов с большим числом ячеек суммированы в табл. IV. Лишь в малой части ячеек ($\approx 1/40$) были обнаружены положительные результаты, на которых остановимся ниже.

Таблица IV. Нейтронные эксперименты группы Техасского университета [6]

Тип ячейки	Количество ячеек	Результаты
1. Pd—Pt (Ni), электролиз	20	Сигнал не обнаружен
2. Pd—Ti, электролиз	130 анализов на Т	< 10 нейтронов/мин
3. Ti—D ₂ -газ	9	< 25 нейтронов/мин
4. Искровой разряд в D ₂	2	< 150 нейтронов/мин
5. Ti, D ₂ -газ, высокочастотная индукция	4	< 150 нейтронов/мин
6. 10 см × 6 мм, Pd—Ni, LiOD, электролиз	3	20—50 нейтронов/мин
7. 25 см × 6 мм, Pd—Ni: NaOD, электролиз		< 16 нейтронов/мин
LiOD, электролиз		400 нейтронов/мин
-8. Стимуляция n, e, γ, α		< 10 нейтронов/мин
9. 5 см × 5 см × 0,25 см, Pd—Ni, LiOD, электролиз		< 10 нейтронов/мин
10. Pd (Ti-сплав) — Ni, LiOD, 4 ячейки		< 10 нейтронов/мин
11. Pd (Ce-сплав) — Ni, LiOD, 4 ячейки		< 10 нейтронов/мин

а) Эксперимент с одновременным электролизом D₂O + LiOD в пяти ячейках с Pd-электродами (\varnothing 6 мм, $l = 2$ см). Предварительно эти электроды в течение 1—2 дней были использованы в нескольких циклах электролиза, после чего их поверхность была очищена. Приблизительно через 10ч после начала электролиза ("цикл 1") был зарегистрирован сигнал, превышавший фон в 4 раза и длившийся 8—10 ч (рис. 2,а).

Процедура очистки и насыщения, повторенная через 2 дня, не дала положительного результата (цикл 2).

После 5 дней зарядки при 20 мА/см² и очистки поверхности был начат цикл 3.

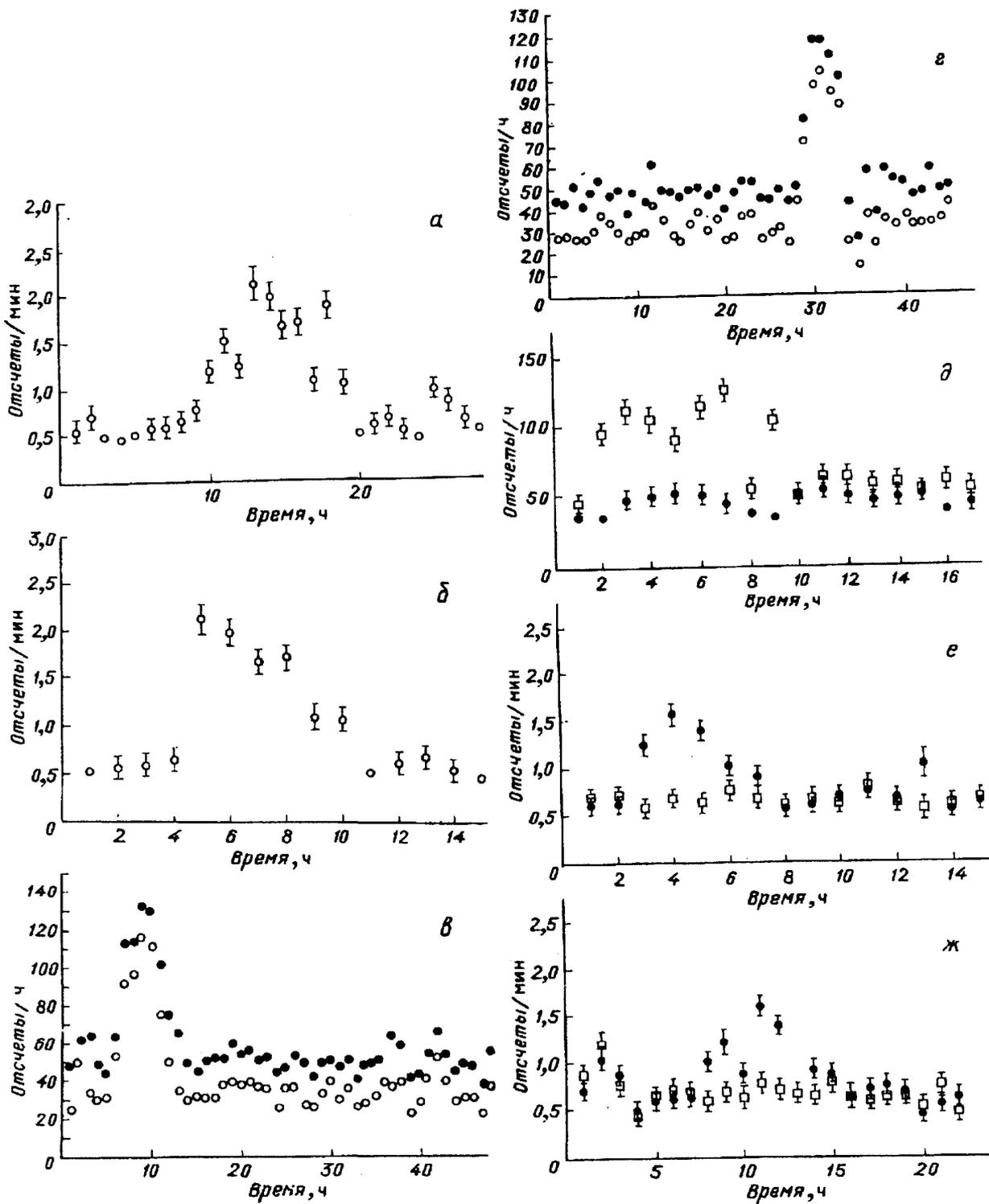


Рис. 2. Результаты регистрации нейтронной эмиссии [6] (а — ж). Первая серия: в — 17.03. 1990 г.; г — 30.03. 1990 г., светлые кружки — 2,6 МэВ, темные кружки — 1–5,5 МэВ; д — е: кружки — система 1, квадраты — система 2; ж — после 8 суток электролиза, 19.05. 1990 г.

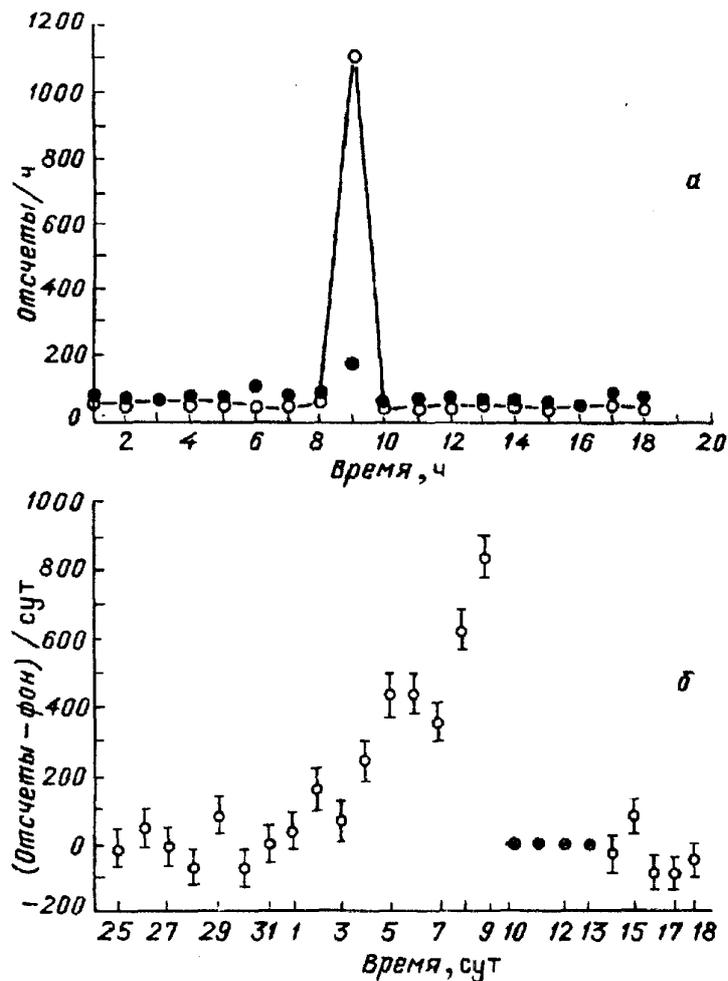


Рис. 3. Результаты регистрации нейтронной эмиссии [6]. Вторая серия: перечеркнутые кружки — электролиз не проводился

Через 5 ч электролиза был зарегистрирован эффект, длившийся 4—6 ч (рис. 2, б).

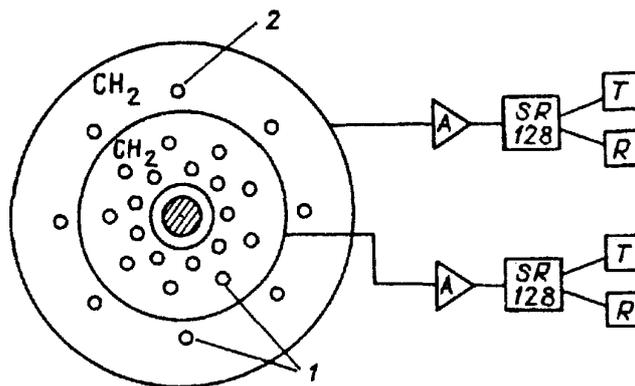
Далее, в течение 7 дней проводился электролиз при токе 20 мА/см^2 , который затем был повышен до 30 мА/см^2 . Через 3,5 ч после повышения тока был зарегистрирован сигнал, превосходивший фон в 4 раза и длившийся 3 ч. Этот цикл показан на рис. 2, в и г для двух энергетических интервалов.

Активность в цикле 9 показана на рис. 2, д. В целом, в экспериментах группы одним рабочим детектором было зарегистрировано 8 периодов активности на уровне в 3—5 раз выше фонового, а с помощью двух рабочих детекторов — 4 периода (цикл 8 показан на рис. 2, е и ж).

б) Эксперимент по одновременному электролизу в 4 ячейках с набором Pd-стержней диаметром 6 мм и общей длиной 25 см. В этом эксперименте первоначально использовался электролит $\text{D}_2\text{O} + 5\text{M NaOD}$. Электролиз в течение трех месяцев не привел к статистически значимому превышению сигнала над фоном. Затем электроды были очищены, отождены в вакууме и электролитически насыщены дейтерием в $\text{D}_2\text{O} + 0,1\text{M LiOD}$. Через 9 ч после начала насыщения был зарегистрирован относительно большой сигнал (рис. 3, а), державший около 1100 событий за 1 ч, что соответствует источнику мощностью примерно 400 нейтронов в минуту.

В дальнейшем в течение нескольких дней также наблюдалась избыточная активность (рис. 3, б).

Рис. 4. Детектор на ^3He -счетчиках. 1 — ^3He -счетчики, 2 — внешнее кольцо, А — усилитель, SR — накопитель, Т — пересчетное устройство полного счета, R — пересчетное устройство для совпадений. Счетчики внутреннего и внешнего кольца имеют независимую электронику и отношение сигналов в этих счетчиках используется для независимого контроля



2.2. Эксперименты по регистрации медленных нейтронов групп Лос-Аламосской национальной лаборатории [5] и Объединенного института ядерных исследований [7].

2.2.1. В течение последних двух лет группа ЛАНЛ проводила опыты по НТС с насыщением титана дейтерием из газовой фазы и термоциклированием. За это время были созданы 4 детектирующие системы на базе гелиевых пропорциональных счетчиков с эффективностью от 20 до 45%, которые в последних экспериментах использовались одновременно. Схематическое изображение одной из этих систем показано на рис. 4. Было проведено детальное изучение и устранение источников ложных сигналов: улучшено экранирование от электромагнитных помех, повышена защищенность от ложных импульсов, обусловленных разрядами при накоплении влаги, часть экспериментов проведена в низкофоновом подземном тоннеле и шахте, с применением низкофоновых ^3He -счетчиков. Фон нейтронов в совпадениях для различного расположения детекторов составлял от 2 событий в час до 0,5 событий в неделю (рис. 5).

Остановимся здесь только на результатах последней серии опытов, пред-

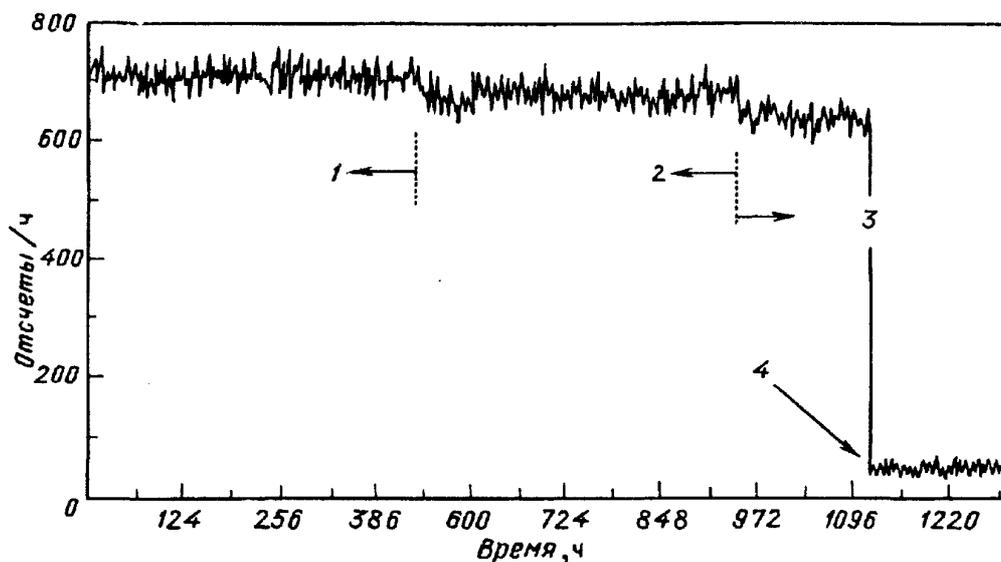


Рис. 5. Фон в зале (1), для двух расположений в тоннеле (2 и 3) и при использовании низкофоновых счетчиков (4)

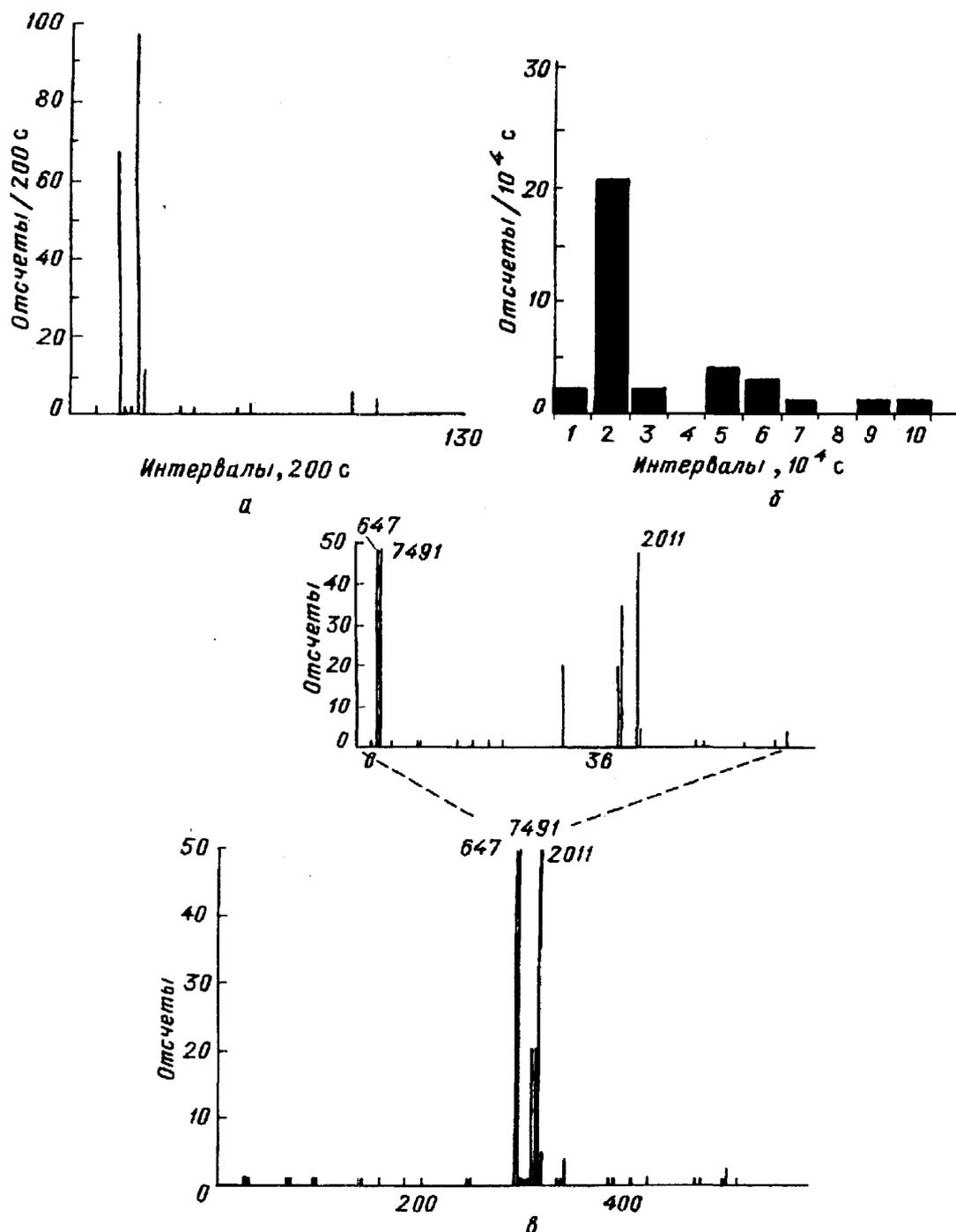


Рис. 6. Результаты по коррелированным нейтронным сигналам. *a* — Интервал для внутреннего кольца 200 с. *б* — Он же для внешнего кольца 10^4 с. *в* — Интервал 100 с

ставленных на конференции в Комо. С целью изучения возможности "активации" титановых образцов были использованы различные режимы насыщения и термоциклирования. Из 19 опробованных вариантов заметной активности удалось добиться лишь в следующих двух экспериментах:

а) В баллон из нержавеющей стали объемом 1 л был помещен Ti (304 г) обезгаженный при 230°C и промытый ^4He . После 7 термоциклов с охлаждением в жидком азоте и последующим отогревом до комнатной температуры, произошло быстрое (за 15 с) экзотермическое поглощение дейтерия. После этого

образец в течение 10 мин охлаждался в жидком азоте и затем был подвергнут отогреванию. В течение первых 2 ч после этого образец испустил три вспышки нейтронов, показанные на рис. 6, а, б.

После трех дополнительных термоциклов с малым уровнем эмиссии образец был помещен в другой детектор, находящийся в тоннеле (на глубине 70 м) и обладающий большей чувствительностью. При первом же термоцикле образец испустил большую вспышку нейтронов (рис. 6, б, в) и затем еще две. Избыток нейтронов наблюдался еще примерно 50 ч, в течение которых было зарегистрировано 15 вспышек. Кроме "больших" вспышек зарегистрирован избыток "малых" коррелированных во времени событий, когда в интервале 128 мкс детектировались 2 нейтрона. Фон коррелированных событий в этом счетчике с контрольной ячейкой составил 2 события/сут.

б) В баллон объемом 250 мл помещалось 56 г Ti в виде титановой губки и обрезков пластин, на одну сторону которых был нанесен тонкий слой Pd. Ранее этот Ti был насыщен дейтерием с помощью электролиза D₂O.

После нагрева до 220°C в вакууме Ti был насыщен D₂ при давлении 53 атм. За 90 дней эксперимента давление в баллоне уменьшилось до 43 атм.

Рис. 7 показывает результаты контрольных измерений с баллоном 300 мл, содержащим 100 г титановой стружки и воздух, и рабочих измерений. Видно, что в течение нескольких дней наблюдался избыток нейтронов, который достигал 1,12 событий/ч.

2.2.2. Дубненская группа использовала детекторы такой же конструкции, что и группа ЛАНЛ, но выполненные на основе VF₃-счетчиков. Внутреннее кольцо содержало 16 счетчиков, а наружное в различных конфигурациях от 17 до 22 при общей эффективности от 20 до 26%. Использовались образцы из Ti, насыщавшегося дейтерием как электролитически, так и из газовой фазы. Отметим следующие отличительные особенности экспериментов этой группы.

а) Структура электроники позволяла получать как амплитудную, так и временную информацию о регистрируемых сигналах, что существенно снижало фон и увеличивало достоверность отбора "полезных" событий.

Записывались все события, приходящие в течение 1 мс после первого импульса. При этом амплитуды первых двух импульсов (соответствующих захвату тепловых нейтронов в борном счетчике $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li}$) анализировались и сравнивались с заданным порогом. Для остальных импульсов регистрировалось время их прихода.

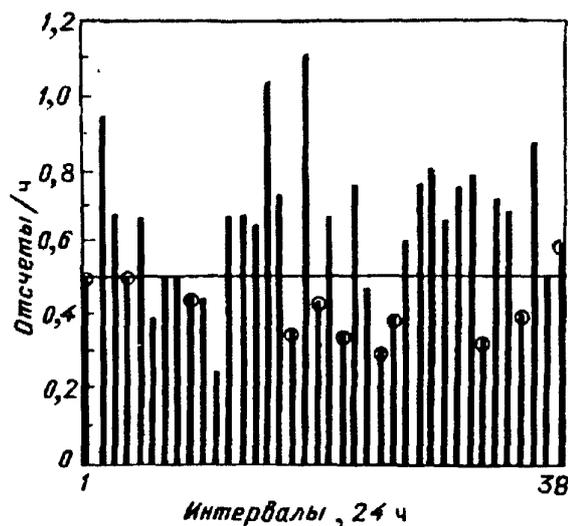


Рис. 7. Счет коррелированных нейтронов. Каждый интервал — 24 ч. Кружки — контрольные измерения. Средний фон 0,50 отсчетов/ч

б) Метод обработки данных основывался на анализе распределения временных интервалов между последовательными событиями внутри "окна" 1 мс и позволял выделить коррелированные события вспышечного типа.

В эксперименте с газовым насыщением использовалось 40 г стружек из титанового сплава (86% Ti + 6% Al + 6% V + 2% Sn), помещенных в цилиндр из нержавеющей стали (\varnothing 28 мм, $l = 1000$ мм). Перед измерениями материал подвергался процедуре вакуумно-термической тренировки и насыщения дейтерием, аналогичной той, которая использовалась группой ЛАНЛ. Затем охлажденный до температуры жидкого азота образец помещался в детектор и в процессе его отогревания до комнатной температуры проводилась регистрация нейтронной эмиссии. По прошествии 14 ч мишень извлекалась из детектора и помещалась в сосуд Дюара с жидким азотом, а на ее место устанавливалась контрольная ячейка без D_2 для фоновых измерений. Всего было выполнено 11 таких циклов. Кроме того, было проведено 7 серий с использованием "криоудара" — нагревания образца до 1000 К и затем быстрого охлаждения в жидком азоте, после чего в течение 2 ч проводилась регистрация нейтронов.

В эксперименте с электролизом $D_2O + 0,1$ М LiOD использовались два типа титановых катодов — без покрытия и с покрытием тонкой (0,4 мкм) Ni-пленкой. Последняя препятствует образованию оксидной пленки и способствует быстрому проникновению дейтерия в титановый образец. Общее время эксперимента 160 ч при токе 120—170 мА/см². Фоновые измерения проводились с H_2O и "свежим" катодом.

Результаты экспериментов с электролизом (при использовании Ti с Ni покрытием) и газовым насыщением близки. В обоих экспериментах зарегистрирована избыточная эмиссия нейтронов в форме вспышек, возникавших со средней частотой (1÷2)/ч. Интенсивность испускания нейтронов во вспышке составляет (3—3,5) · 10⁴ с⁻¹ и средняя длительность вспышки 300 мкс. Следует подчеркнуть, что при использовании Ti катода без Ni покрытия статистически значимого превышения сигнала над фоном не зарегистрировано.

2.3. Эксперименты по регистрации быстрых и медленных нейтронов. "Быстро-медленный" вариант регистрации нейтронов был использован в экспериментах по НТС группой С. Джонса из Университета Брайама Янга и затем группами Физического института им. П.А. Лебедева-Луганского машиностроительного института и Университета в Осаке. Результаты этих работ изложены в обзорах [1, 8], и здесь мы на них останавливаться не будем.

2.4. Американско-японский эксперимент на подземном черенковском детекторе Камиоканде. Группа С. Джонса из Университета Брайама Янга сообщила на совещании в Хаф Мун Бэй [9] предварительные результаты экспериментов, выполненных совместно с японскими физиками на подземном нейтринном детекторе в шахте Камиока. Эксперимент

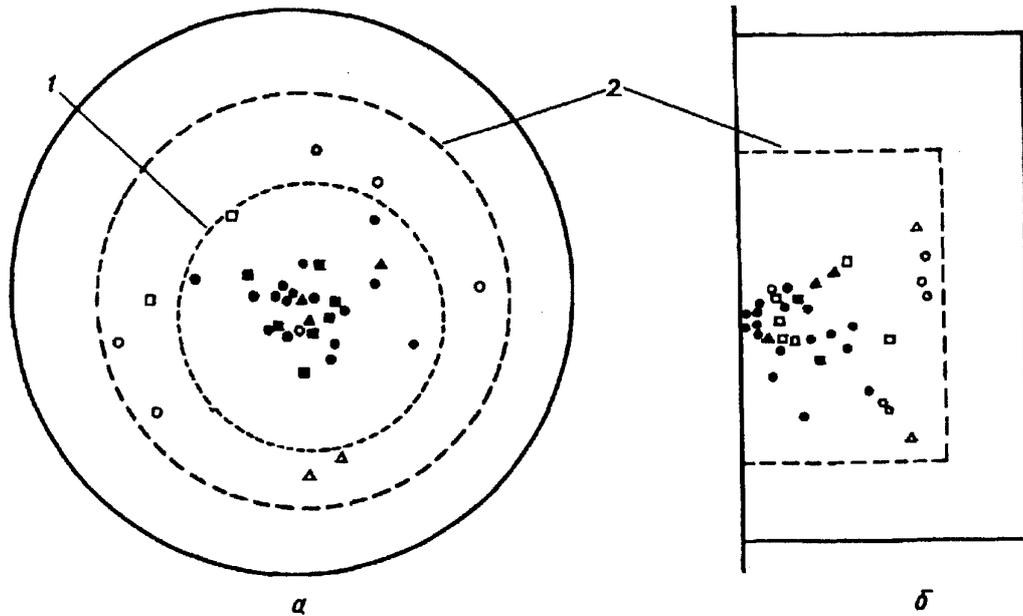


Рис. 8. Восстановленные вершины нейтронных событий в детекторе Камиоканде [9]. *а* — Вид сверху. *б* — Вид сбоку. Круги — сеанс в апреле 1991 г., 457 ч: темные круги — сигнал, светлые — фон. Треугольники — сеанс в июле 1991 г. 517 ч: темные треугольники — сигнал, светлые — фон. 1 — рабочий объем радиуса 3,5 м, 2 — объем 680 м³

интересен тем, что в нем используется одна из крупнейших современных установок, работающих в области физики элементарных частиц. Чрезвычайно благоприятные фоновые условия и хорошая эффективность регистрации позволяют получить данные, обладающие высокой достоверностью. Детектор содержит около 4500 т очищенной воды, просматриваемой примерно тысячей фотоумножителей, которые регистрируют черенковский свет. В рассматриваемом эксперименте он испускается электронами и позитронами, образованными γ -квантами. Последние излучаются при захвате нейтронов (предположительно от НТО ядрами хлора $n + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow \gamma + \dots$ в специальном объеме, окружающем ячейку и наполненном раствором соли. Фоновые сигналы мониторируются во внешнем водном объеме, окружающем центральный рабочий объем. В этой центральной части детектора, диаметром 2 м, фоновый счет составляет около 0,25 событий/ч. Эффективность регистрации нейтронов, исходящих из ячейки, составляет 20%.

На рис. 8 показано распределение восстановленных вершин для событий вспышечного типа, возникших в процессе работы электролитической ячейки (сигналы регистрируются в пределах временных интервалов 500 мкс). Изучение образцов, насыщенных как дейтерием, так и водородом в общей сложности в течение 3450 ч, показало, что вероятность имитаций событий за счет распадов ядер урана, находящихся в виде примесей в Pd, Ti и других материалах ячейки, очень мала и составляет $\lesssim 2 \cdot 10^{-4}$.

В отдельном эксперименте было измерено нейтронное излучение, возникающее при затвердевании бетона, который был приготовлен на тяжелой воде. Получена высокая статистическая значимость эффекта.

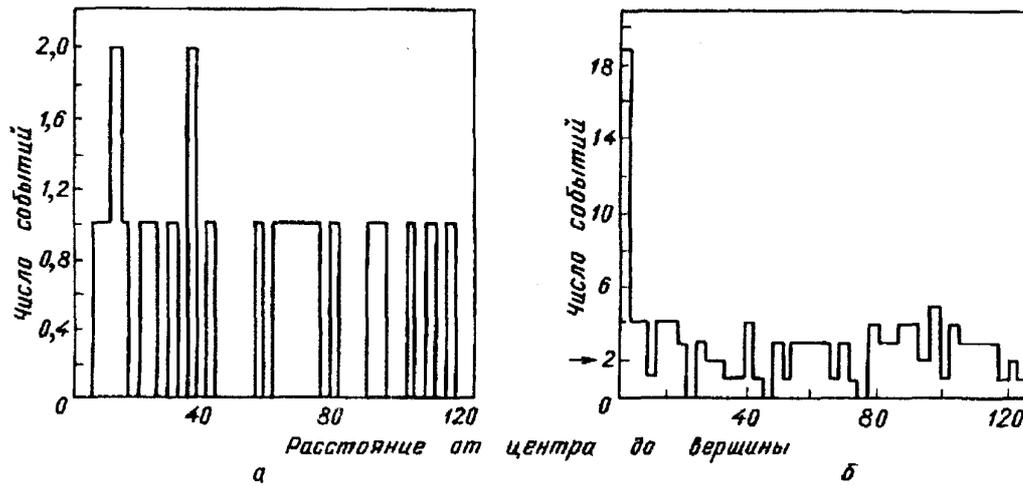


Рис. 9. Распределение вершин в детекторе Камиоканде [9]. а — H_2O -бетон, 26,4 ч. б — D_2O -бетон, 44,5 ч

Рис. 9 показывает распределение восстановленных вершин от единичных нейтронных событий для эксперимента с D_2O -бетоном, сопоставленное с результатами измерений с H_2O -бетоном. Видно, что только в случае использования бетона на тяжелой воде, эмиссия нейтронов регистрируется в центральной части детектора. Нарис. 10 показано распределение числа "сработавших" ФЭУ, хорошо согласующееся с аналогичным распределением, полученным в калибровочных измерениях с радиоактивным источником ^{253}Cf .

Эмиссия нейтронов зарегистрирована во всех трех использованных образцах D_2O -бетона в процессе его затвердевания (табл. V). В отличие от этого эмиссия не обнаружена ни в образцах H_2O -бетона, ни в бетоне, в который в процессе приготовления закачивался воздух их шахты, после чего бетон выдерживался в течение 6 месяцев. Эти результаты означают, что долгоживущие изотопы, как возможный источник ложных сигналов, по-видимому, исключаются. Ряд дополнительных экспериментов исключил также возможные эффек-

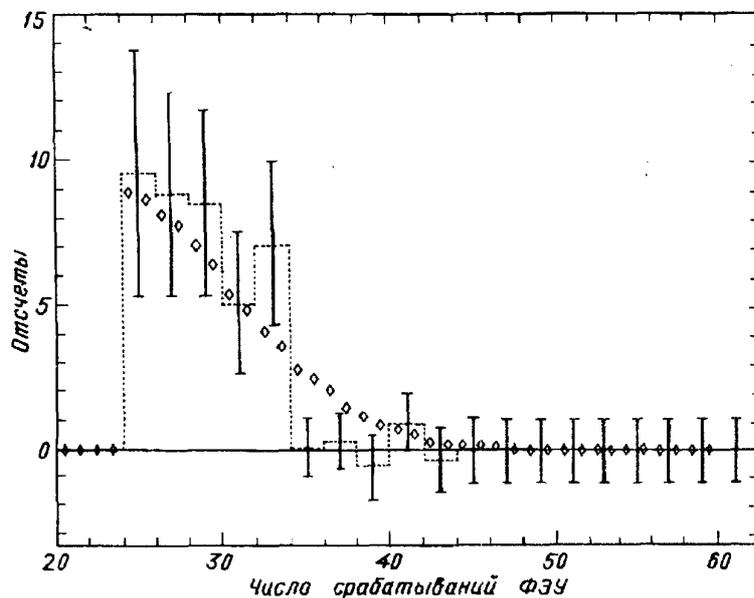


Рис. 10. Распределение по числу сработавших ФЭУ после вычитания фона [9]. Ромбики — результат калибровки с ^{253}Cf

ты распада радона. Были проведены измерения α -активности бетонной смеси, которая могла бы генерировать нейтроны в $d(\alpha, n)p$ -реакции. Найдено, что она, по крайней мере, в 100 раз ниже той, которая необходима для объяснения эффекта. Предполагается провести еще ряд дополнительных контрольных экспериментов.

Таблица V. Эмиссия нейтронов, зарегистрированная в детекторе Камиоканде при затвердевании D_2O - и H_2O -цементов [9]

Серия	Длительность, ч	Скорость счета после вычитания фона, 10^{-4} с^{-1}	Образец
1	41,95	$7,2 \pm 2,2$	790 г D_2O -бетона
2	4,46	$-0,67 \pm 4,6$	800 г H_2O -бетона
3	39,11	$0,64 \pm 1,1$	790 г D_2O -бетона, после 6 месяцев
4	44,51	$5,8 \pm 1,7$	1210 г D_2O -бетона
5	26,34	$-0,67 \pm 0,88$	1300 г H_2O -бетона
6	47,18	$-0,47 \pm 0,85$	D_2O -бетон, воздух из шахты
7	65,97	$6,3 \pm 1,4$	760 г D_2O -бетона
8	45,55	$7,0 \pm 1,7$	760 г D_2O -бетона

3. Тритий

К настоящему времени разработан ряд чувствительных методов регистрации присутствия трития в различных средах, которые используются в экспериментах по НТС. В табл. VI и VII из [10] сравниваются основные особенности различных методик, применяемых для газовых и жидких образцов.

Таблица VI. Сравнение различных методов регистрации трития в газах [10] ($1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}$ распадов/с)

Минимальная детектируемая концентрация	Метод	Время	Объем образца газа, см^3	Дискриминация	Широкое применение
5 пКи	Конденсация, сикатив, счетчик на жидком сцинтилляторе	1 ч	1300	Да	Да
10 пКи	Пропорциональный счетчик с наполнением исследуемым газом	1 мин	300	»	»
100 пКи	Ионизационная камера	»	2000	Нет	»
1 нКи	Счетчик на пластическом сцинтилляторе	»	20	Да	Нет
10 нКи	Фотопленка	1 день	—	Нет	»
100 нКи	Лавинный диодный детектор	1 мин	0,02	Да	»

Таблица VII. Сравнение различных методов регистрации трития в жидкостях [10]

Минимальная детектируемая концентрация	Метод	Время	Объем образца, см ³	Дискриминация	Широкое применение
1 фКи/см ³	Накопление ³ He, масс-спектрометрия	1 месяц	10	Да	Нет
10 фКи/см ³	Счетчик на жидком сцинтилляторе, обогащение	1 мин	100	»	Да
1 пКи/см ³	Счетчик на жидком сцинтилляторе	»	1	»	»
5 пКи/см ³	Счетчик на пластическом сцинтилляторе	»	20	»	Нет
10 пКи/см ³	Пропорциональный счетчик, лавинный диод	»	—	»	Да
1 нКи/см ³	Фотопленка	1 день	—	Нет	Да

Для регистрации трития в твердых телах в зависимости от требуемой чувствительности, размеров образца и возможности (или невозможности) его разрушения также может быть использована различная методика [10]. В частности, в случае порошков, хорошие результаты могут быть получены путем приготовления суспензии на сцинтиллирующих гелях. Наибольшую чувствительность при измерениях с малыми образцами без их разрушения дает использование проточных газовых пропорциональных счетчиков. Меньшей чувствительностью обладают лавинные полупроводниковые детекторы, фотопленки и измерение β -стимулированного рентгеновского излучения.

3.1. Эксперименты группы Лос-Аламосской национальной лаборатории по регистрации трития в Pd — Si — D₂-ячейке [10]. В экспериментах этой группы применялся оригинальный метод иницирования реакций НТС, основанный на пропускании пульсирующего электрического тока через чередующуюся систему слоев Pd и Si, помещенных в дейтериевую атмосферу. Ранние результаты измерений уже обсуждались в [8]. В новых экспериментах была значительно улучшена чувствительность за счет использования дейтерия с низким содержанием трития (фоновый уровень T в D₂ был уменьшен в 300 раз). Кроме того, ячейки с "вафлями" из Pd-фольги были выполнены с высокой степенью идентичности электрических характеристик, что позволило добиться хорошей воспроизводимости результатов и выделить условия, благоприятные для НТС.

Типичная ячейка (рис. 11) содержала от 12 до 21 г Pd восьми слоях (1—2 г

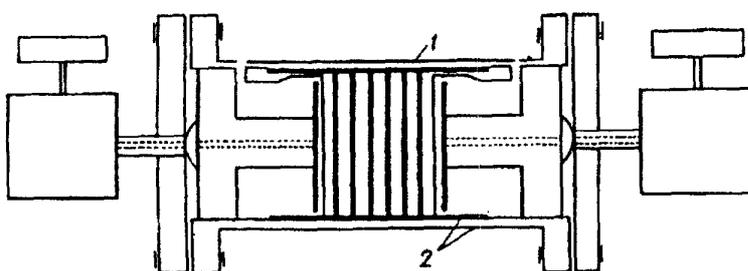
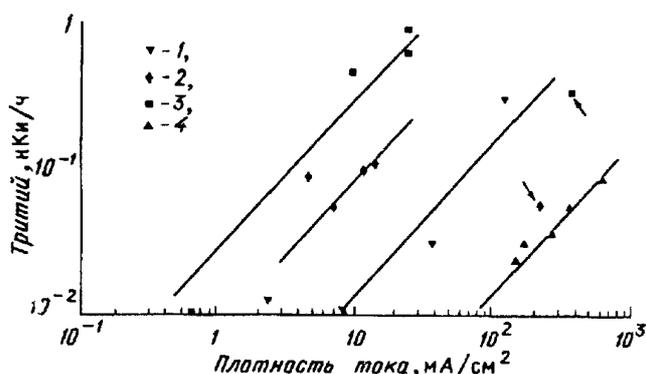


Рис. 11. Pd — Si — D₂-ячейка [10]. 1 — слои Pd и Si, 2 — керамическая изоляция

Рис. 12. Образование трития в эксперименте ЛАНЛ [10] коррелированное с плотностью тока и типом ячейки. 1 — нет оксидного слоя, 2 — естественный оксидный слой, 3 — усиленный оксидный слой, 4 — фольга и "вафли"; стрелки — пробой



на слой) и 6—8 г Si, распределенного в 7 слоях толщиной 0,76—2,15 мм и диаметром 3,17 см. Pd был спрессован из порошка в форме диска и затем окислен на воздухе при температуре 350 °С в течение двух часов. Использовалась также палладиевая фольга. Чередующиеся слои Pd и Si прессовались в форме керамики. Тщательно контролировались возможные примеси. Дейтерий имел очень низкое содержание трития ($0,15 \text{ мКи/м}^3$; $1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}$ распадов/с) и 99,995% чистоту. Палладиевый порошок был получен путем осаждения из водного раствора Pd $(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2$ и имел размеры частиц 0,3—0,5 мкм, образующие агломераты 30 мкм в диаметре. Всего в эксперименте было использовано 512,7 г порошка Pd, из которых 87,3 г — в различных контрольных измерениях и 43,2 г Pd-фольги. Кремниевый порошок имел размеры 10—20 мкм и склеивался клеем ПВА, который также был проверен на содержание трития.

Измерения на T проводились после окисления D_2 с помощью ионизационного счетчика. Из-за адсорбции T на стенках анализирующей системы минимальный фон составлял 3—4 мк Ки/м³. Этот "эффект памяти" типичен для аппаратуры, используемой в длительных тритиевых измерениях. Содержание T определялось в исходном D_2 , в D_2 после заполнения ячейки, в D_2 после проведения серии электропulses и дегидридации Pd.

Суммарные результаты измерений показаны на рис. 12. Видно, что ячейки распадаются на несколько групп с различной эффективностью. Выход T внутри каждой группы оказывается пропорциональным току. Наибольшую воспроизводимость демонстрируют ячейки из Pd-фольги, обладающие практически идентичными электрическими характеристиками от ячейки к ячейке. Наибольшая скорость генерации T получена в ячейках, содержащих спрессованный порошок Pd и Si при напряжении более 800 В и токе $\approx 0,1$ А. Интересно, что в четырех контрольных ячейках, заполненных водородом, также был обнаружен небольшой избыток T, составляющий в целом от 6 до 12 нКи. Авторы относят этот эффект на счет вытеснения водородом небольших количеств TDO из ионизационной камеры и со стенок газовой системы.

Хотя в большинстве ячеек избыток трития невелик, в одной из ячеек он оказался в 540 раз больше максимального количества T, найденного при растворении образцов и в 2,2 раза больше общего количества T, содержавшегося во всем дейтерии, использованном для наполнения ячеек. Наибольшая скорость, достигнутая воспроизводимым образом, оценивается как $3,4 \cdot 10^6$ атомов трития в секунду.

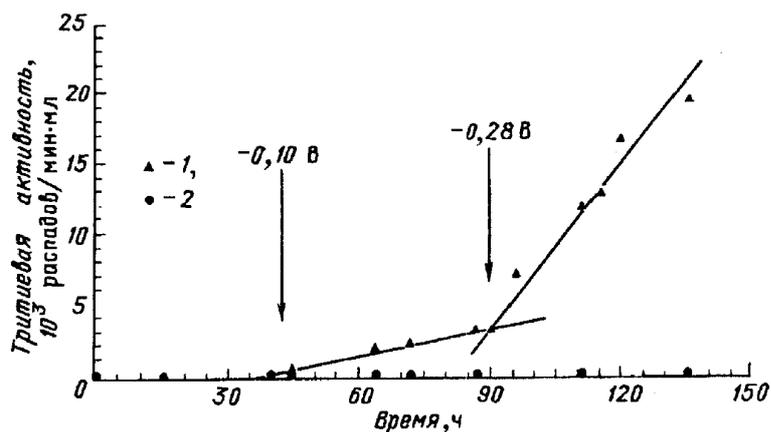


Рис. 13. Зависимость тритиевой активности от времени электролиза [11]. Треугольники — рабочая ячейка, кружки — контрольная ячейка; стрелками показаны моменты изменения потенциала

3.2. Эксперименты по регистрации Т при электролизе D_2O группой Техасского университета. В недавнем эксперименте группы Дж. Бокриса [11] использовалась стандартная методика электролиза в ячейке открытого типа с электролитом $D_2O + 0,1 M LiOD$. Катод из Pd представлял собой цилиндр длиной 1,6 см и диаметром 1 см. Общая продолжительность измерений составляла 760 ч.

На рис. 13 и 14 показаны результаты измерений тритиевой активности электролита в процессе электролиза. Первоначальная зарядка при небольшом катодном потенциале $-0,05 V$ и $j \leq 0,1 mA \cdot cm^{-2}$ в течение 30–40 часов не показала роста Т выше фона (12 ± 3 распадов/мин·мл). После увеличения потенциала катода $U_{до} -0,10 V$ была зарегистрирована реакция образования Т со скоростью $\dot{N}_T \approx 2,1 \cdot 10^6$ атомов Т/с·см². Как видно из рис. 14 при увеличении U происходило дальнейшее увеличение скорости образования Т. Наибольшая скорость $3,8 \cdot 10^7$ Т/с·см² была получена после 327 ч электролиза. Реакция была погашена на 406 ч после добавления D_2O и опять восстановилась после 471 ч без увеличения потенциала. Однако дальнейшее увеличение U не привело к росту \dot{N}_T . После 760 ч электролиз был остановлен. Попытки в дальнейшем с тем же электродом восстановить образование Т успеха не имели. Результаты суммированы в табл. VIII.

Таблица VIII. Результаты анализа на Т [11]

Т в электролите	Т в газе (предполагая $T_r/T_x = 5$)	Т в Pd (растворение в царской водке)	Т в Pd (анодный разряд)
$1,6 \cdot 10^{14}$ атомов Т Или $1,5 \cdot 10^{13}$ Т/г Или $2,5 \cdot 10^{13}$ Т/см ²	$8,1 \cdot 10^{14}$ Т Или $5,4 \cdot 10^{13}$ Т/г Или $1,2 \cdot 10^{14}$ Т/см ²	$5,1 \cdot 10^9$ Т/г Pd Или полное число в Pd $7,6 \cdot 10^{10}$ Т	$8 \cdot 10^9$ Т/г Pd Или полное число в Pd $1,2 \cdot 10^{11}$ Т
Полное число атомов Т, образованных в электролите, газе, металле: 10^{15} Т атомов или $6,9 \cdot 10^{13}$ Т/г или $1,5 \cdot 10^{14}$ Т/см ²			

Поскольку наибольшая критика результатов измерений по Т связана с возможностью примесей в исходных материалах, авторы провели ряд контроль-

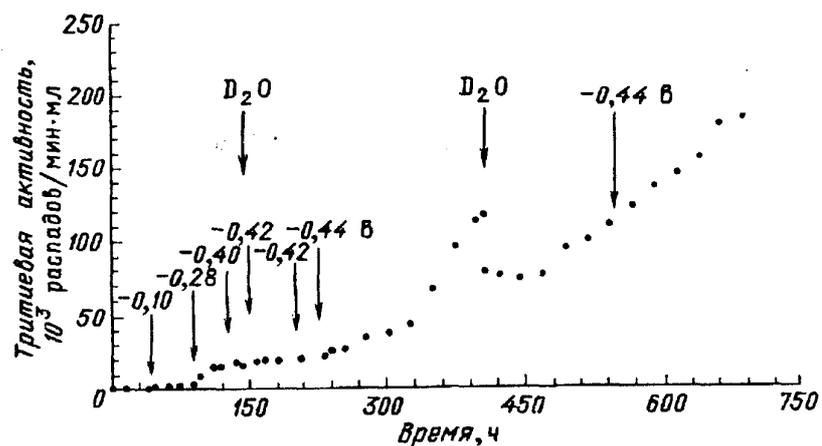


Рис. 14. Зависимость тритиевой активности в рабочей ячейке от времени электролиза; стрелками показаны моменты изменения потенциала и добавления D_2O

ных измерений.

а) Три измерения на Т в образцах из той же партии, что была использована в эксперименте.

б) Несколько образцов было передано для анализа на ^3He экспертам "Рокуэл Интернейшнл". Примеси ^3He выше фонового уровня (10^9 ^3He) не были обнаружены. Это является аргументом в пользу того, что основная масса Т, найденного в электролите, образована в ходе эксперимента и не является результатом тритиевых примесей в исходных материалах.

в) Сравнение с контрольной ячейкой, не выявившей образования Т, дало ограничение на возможный подхват Т из окружающего воздуха.

г) Тот факт, что электрод после 760 ч перестал образовывать Т, также свидетельствует против возможного подхвата Т из воздуха.

Приведенные выше примеры детектирования НТС с помощью регистрации трития выглядят довольно убедительно. (Напомним, что всего к настоящему времени в литературе опубликовано более 40 сообщений о регистрации аномального образования трития при электролизе D_2O [12]. При этом в $\approx 20\%$ работ измеренное количество трития в 10^2 — 10^4 раз превышает фон.) Однако, в действительности, ситуация далеко не столь однозначна. Дело в том, что использование в качестве сигнала НТС такого распространенного нуклида, как тритий, обладает рядом отрицательных особенностей по сравнению с прямым наблюдением ядерных эффектов в режиме реального времени [6]. Очень трудно избежать примесей и загрязнений. Один из исходных материалов экспериментов по НТС — D_2O (или D_2) всегда содержит примесь трития. Хотя сообщаемые в литературе количества атомов Т велики, чувствительность измерения на много порядков ниже, чем при регистрации нейтронов. Как отмечено в [13], использование открытой ячейки также может приводить к ложным эффектам. В [6] были указаны возможные источники ошибок в тритиевых измерениях по β -распаду: а) ошибки регистрации, включая хемилюминесценцию и неправильное определение фона; б) "внешнее" загрязнение, что особенно вероятно в лабораториях, проводящих эксперименты с тритием; в) "однородное" загрязнение материалов ячейки; г) "неоднородное" (локализованное в изолированных областях образцов) загрязнение; д) увеличение содержания Т за счет естествен-

ного фактора T/D-сепарации. Для устранения различных ложных эффектов требуются различные контрольные опыты. Для однозначной идентификации T по β -распаду недостаточно просто подсчитывать импульсы счетчика. Необходимо измерение стабильного, воспроизводимого энергетического спектра с правильной формой и максимальной энергией.

Особенно трудно исключить ложные эффекты, обусловленные локализованными примесями T в исходном металле. Для этого необходимо проведение тщательного анализа большого числа проб, взятых из различных участков материала. Подобный анализ был проведен группой К. Вольфа [6] и выявил присутствие T в исходном Pd в виде очень небольших изолированных "пятен" с высокой концентрацией T. Проведенная этой группой серия измерений со ста ячейками показала избыток T только в двух из них, что, по мнению авторов, может быть вполне объяснено в пределах статистики как результат скрытых примесей в Pd. После этих опытов К. Вольф отказался от своих предварительных результатов по T, выполненных ранее совместно с группой Дж. Бокриса, в которых не было проведено тщательного исследования исходных материалов.

4. Регистрация ^4He

Большой интерес и оживленную дискуссию вызвали недавние сообщения об обнаружении наработки ^4He при электролизе.

4.1. Группа исследователей из Техасского университета в г. Остине и Центра военно-морского вооружения (Чайна Лэйк) провела калориметрические измерения и анализ на ^4He газов, выделяющихся при электролизе $\text{D}_2\text{O} + \text{LiOD}$ на Pd [14]. Обнаружено, что образующиеся газы содержат ^4He в тех случаях, когда в электролизе зарегистрирован значительный избыток тепла. Кроме того, было обнаружено почернение рентгеновских пленок, помещенных вблизи двух работающих ячеек. Контрольный эксперимент с $\text{H}_2\text{O} + \text{LiOH}$ не обнаружил ни He, ни почернения пленки.

В экспериментах использовался криофильтр из активированного угля, что позволило удалить мешающие примеси D_2 и O_2 из выделяющихся при электролизе газов и однозначно идентифицировать He с помощью прецизионного масс-спектрометра. Хотя природа реакций, приводящих к генерации тепла и ^4He неизвестна, авторы используют как основу для оценок процесс $\text{d} + \text{d} \rightarrow ^4\text{He} + \gamma + 23,4 \text{ МэВ}$, при котором энерговыделение в 1 Вт соответствует образованию $2,66 \cdot 10^{11}$ атомов ^4He в 1 с. Наибольший обнаруженный ими избыток тепла $1,3 \text{ Вт/см}^3$ соответствует $5,4 \cdot 10^{14}$ атомов ^4He за время, необходимое для наполнения пробного объема 500 см^3 . Найденное количество He более чем на два порядка превышает предел чувствительности использованного метода. Наблюдаемая корреляция избытка тепла и образования ^4He рассматривается авторами как сильный аргумент в пользу ядерной природы процессов, приводящих к

энерговыведению в электролитических экспериментах.

4.2. Группа исследователей из Гавайского университета [15] провела эксперимент по электролизу LiOD в расплаве солей KCl при температуре $\geq 350^\circ\text{C}$ и токе 700 mA/cm^2 с анодами из Pd и Ti и алюминиевым катодом. В четырех образцах Pd обнаружено с помощью масс-спектрометрии образование ^4He на уровне до 14σ выше фона. Для всего электрода это соответствует превышению над фоном $4 \cdot 10^{10}$ атомов ^4He . Это существенно меньше, чем следует из найденного в этом же эксперименте избыточного энерговыведения, если за него ответственна реакция $d + d \rightarrow ^4\text{He} + \gamma$. В течение 4 суток было зарегистрировано избыточное энерговыведение на уровне $\Delta Q/Q \sim 500\text{--}1500\%$ от подводимой энергии. Максимальный эффект составил 25 Вт или 600 Вт/см .

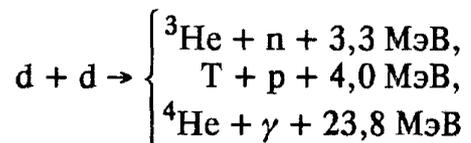
4.3. Группа Дж. Бокриса в описанном выше эксперименте также регистрировала образование ^4He при электролизе D_2O на Pd электроде. Результаты анализа, проведенного в лаборатории "Рокуэл Интернейшнл", представлены в табл. IX.

Таблица IX. Результаты анализа на ^4He образцов Pd, подвергнутых электролизу в D_2O [11]

Образцы вблизи поверхности		Образцы, удаленные от поверхности	
Масса образца, мг	$\text{He}^4/10^9$ (или $10^{11}/\text{г}$)	Масса образца, мг	$\text{He}^4/10^9$ (или $10^{11}/\text{г}$)
1) 30,92	$3,8 \pm 0,3$ ($1,2 \pm 0,1$)	27,79	$1,9 \pm 0,3$ ($0,7 \pm 0,1$)
2) 39,70	$166,8 \pm 3,3$ ($42 \pm 0,8$)	30,01	$2,5 \pm 0,3$ ($0,8 \pm 0,1$)
3) 42,37	$3,4 \pm 0,3$ ($0,8 \pm 0,1$)	23,85	$0,4 \pm 0,3$ ($0,17 \pm 0,12$)
4) 20,22	$2,1 \pm 0,6$ ($1,0 \pm 0,3$)	33,05	$1,7 \pm 0,6$ ($0,5 \pm 0,2$)
5) 44,63	$1,9 \pm 0,5$ ($0,4 \pm 0,1$)		
6) 30,40	$-0,1 \pm 0,5$ ($0,03 \pm 0,1$)		
Среднее фоновое значение: $0,5 \cdot 10^9$ атомов He^4			

4.4. На совещании в Хаф-Мун Бэй группой из "Рокуэл Интернейшнл" [16] были представлены результаты анализа образцов Pd и выделяющихся газов для пяти экспериментов по НТС, в которых, по заявлению авторов этих экспериментов, была обнаружена генерация ^4He . Группа использовала гелиевый масс-спектрометр, который является уникальной национальной установкой, предназначенной для проведения измерений очень малых концентраций гелия в твердых веществах и различных водных растворах. Динамический диапазон измерений: от процентов до 10^{-12} . При этом почти во всей области может быть достигнут уровень точности 1%. Кроме того, установка позволяет проводить

прецизионные измерения на тритий путем регистрации продукта его распада — ${}^3\text{He}$. Точность измерений для Pd была проверена в специальных контрольных опытах с образцами, насыщенными методом ионной имплантации (6 Pd фольг насыщались дозами 10^{10} — 10^{11} атомов ${}^4\text{He}$), масс-спектрометр позволял регистрировать присутствие ${}^3\text{He}$ или ${}^4\text{He}$ на уровне 10^9 атомов. Это соответствует уровню регистрации $6 \cdot 10^{11}$ атомов на $\text{см}^3 \text{Pd}$. Для гипотетических реакций dd-синтеза это соответствует следующему уровню энерговыделения:



и

$$\Delta \dot{Q} = \begin{cases} 0,3 \text{ Дж/см}^3 \text{ Pd}, \\ 80 \quad \gg, \\ 2,3 \quad \gg \end{cases}$$

соответственно.

Группой было проведено около 300 измерений палладиевых образцов, полученных из 16 лабораторий и университетов, проводивших опыты по НТС. Ни в одном из них не было зарегистрировано измеримое количество атомов ${}^3\text{He}$.

В некоторых образцах, полученных из следующих пяти лабораторий, было найдено присутствие ${}^4\text{He}$ выше порога чувствительности спектрометра ($5 \cdot 10^8$ атомов). Университет Юта (Флейшман и Понс), Этек (Лэдвиль; эксперимент с мюонами), Гавайский университет (расплав солей), "Луч" (Подольск, Газовый разряд в D_2), Техасский университет (Бокрис).

Рассмотрим в качестве примера результаты анализа пяти стержней, приготовленных Флейшманом и Пенсом. Три из них были подвергнуты ионной имплантации гелием с различными дозами; два из этих стержней были затем подвергнуты электролизу — один в LiOH, другой — в LiOD. Один из стержней не подвергался какому-либо насыщению. Наконец, последний был подвергнут электролизу в LiOD (без имплантации). Отдельные образцы из различных участков стержней были подвергнуты анализу в пяти независимых лабораториях. Ни одна из них не обнаружила присутствия ${}^3\text{He}$; ${}^4\text{He}$ был найден всеми пятью лабораториями во всех пяти стержнях (табл. X). Выводы группы "Рокуэл Интернейшнл":

— имплантированный гелий не устранился из Pd последующим электролизом.

— ${}^4\text{He}$ в электролизованном стержне и в стержне, не подвергнутом насыщению дейтерием, целиком содержался во внешнем слое $\lesssim 25 \text{ мкм}$.

— уровень ${}^4\text{He}$, найденный после электролиза, был выше чем в необработанном стержне, но все же слишком низок, чтобы объяснить избыток тепла в экспериментах Флейшмана и Понса.

— присутствие ${}^4\text{He}$ в необработанном образце делает очень трудной интерпретацию всего эксперимента.

Таблица X. Результаты анализа [16] на ^3He и ^4He пяти образцов, приготовленных Флейшманом и Понсом

Номер стержня	Обработка образца	Масса образца, мг	Результаты измерений	
			^3He	^4He
1	Ионная имплантация, электролиз в LiOD	8,79	$<1 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10 \cdot 10^{14}$
		7,15	$<1 \cdot 10^{11}$	$4,14 \cdot 10^{14}$
2	Необработанный образец	19,13	$<3 \cdot 10^8$	$3,53 \cdot 10^{10}$
		24,57	$<3 \cdot 10^8$	$3,00 \cdot 10^{10}$
		28,07	$<3 \cdot 10^8$	$6,01 \cdot 10^{10}$
		21,23	$<3 \cdot 10^8$	$3,79 \cdot 10^{10}$
		5,97	$<1 \cdot 10^{11}$	$8,91 \cdot 10^{13}$
3	Ионная имплантация	5,08	$<1 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^{14}$
		10,00	$<1 \cdot 10^{11}$	$3,08 \cdot 10^{14}$
4	Ионная имплантация, электролиз в LiOH	6,66	$<1 \cdot 10^{11}$	$1,74 \cdot 10^{14}$
		24,30	$<2 \cdot 10^8$	$2,84 \cdot 10^{11}$
5	Электролиз в LiOD	17,55	$<2 \cdot 10^8$	$1,17 \cdot 10^{11}$
		26,64	$<3 \cdot 10^8$	$2,26 \cdot 10^{11}$
		16,27	$<3 \cdot 10^8$	$9,80 \cdot 10^{10}$

Еще более разительно последнее обстоятельство проявилось при анализе Pd из экспериментов Гавайского университета. В двух образцах из стержня, подвергнутого электролизу, было найдено $(0,7 \pm 0,3) \cdot 10^9$ и $(6,2 \pm 0,3) \cdot 10^9$ атомов ^4He , тогда как из необработанного стержня (полученного от того же поставщика) в трех образцах зарегистрировано $(15,0 \pm 0,3) \cdot 10^9$, $(12,5 \pm 0,3) \cdot 10^9$ и даже $(195,3 \pm 3,9) \cdot 10^9$ атомов ^4He . Это, возможно, служит подтверждением уже упомянутого выше результата группы Вольфа о весьма неоднородном распределении примесей и локализации их в отдельных областях образцов.

Авторы указывают также на возможные причины избытка ^4He . В экспериментах группы Техас — Чайна Лэйк это может быть диффузия ^4He через стенки контрольной стеклянной колбы из окружающего воздуха. В эксперименте группы "Луч" — примесь ^4He в D_2 при газовом разряде.

Группа "Рокуэл Интернэйшнл" продолжает свои измерения (в частности, материалов Бокриса и др.), поэтому их выводы носят пока предварительный характер. Тем не менее они подчеркивают следующие обстоятельства:

— необходимость анализа контрольных материалов, подвергнутых электролизу в H_2O ;

— необходимость вакуумной обработки Pd для устранения остаточных примесей изотопов водорода, чтобы исключить их интерференцию при анализе ^4He ;

— пока не ясно, обусловлено ли присутствие ^4He , наблюдаемого в некоторых образцах, реакциями НТС или примесями; однако совершенно очевидно, что наблюдаемые количества ^4He слишком малы, чтобы объяснить тепловые эффекты, на которые претендуют некоторые авторы.

5. Теоретические модели НТС

Трехлетняя история развития работ по НТС показала, что задача теоретического описания механизма этого явления оказалась не менее сложной, чем получение однозначных экспериментальных выводов. В результате ситуация в области теории остается столь же неясной, как и в эксперименте.

В настоящее время не существует последовательной теории, которая, исходя из первых принципов, предсказывала бы НТС и его особенности. Поэтому вполне естественно, что обсуждение механизма НТС ведется на базе различных моделей, основу которых составляют те или иные исходные физические гипотезы.

Общее число опубликованных моделей очень велико. Здесь я ограничусь лишь общим кратким резюме своего понимания ситуации в теории. Более полное критическое обсуждение различных моделей НТС и ссылки на оригинальные работы можно найти в обзоре [17] (см. также более ранние обзоры [1, 2, 8, 12, 18]).

Весьма существенную роль в построении моделей (явно или неявно) играет также "методологический" аспект. Хотя, в конечном счете, все теоретические работы мотивируются стремлением объяснить эксперимент, важное различие состоит в степени критичности (или доверия) по отношению к имеющимся экспериментальным результатам. Одни авторы склонны принимать как данное всю совокупность опубликованных результатов, включая избыточное тепловыделение, преобладание трития, нейтронные вспышки и т.п. В этом случае задача состоит в объяснении всех этих эффектов в рамках единого подхода. Другие предпочитают сохранять более осторожное отношение к эксперименту. Их цель, — приняв какую-либо физическую гипотезу, понять, какие наблюдаемые следствия возможны на ее основе.

Если рассматривать различные модели, переходя по шкале характерных энергий от малых ($\lesssim 1$ эВ), соответствующих "истинно холодному" синтезу, к умеренным ("теплый" синтез с $E \sim 1-100$ эВ) и затем большим ($\sim 1-10$ кэВ), соответствующих "горячему" слиянию, то оказывается, что такая последовательность в значительной мере отвечает движению от более экзотических моделей, предполагающих "новую физику", к более простым и "естественным".

Значительное число попыток связано с первоначальными надеждами на осуществление непрерывного синтеза в стационарных условиях в решетке (подробнее см. [1]). В связи с этим рассматривались различные конфигурации межатомных полей и эффекты экранирования с точки зрения возможности сближения ядер дейтерия при тепловых энергиях на расстояния $\sim 0,1 \text{ \AA} \ll R_{D_2}$, достаточные для объяснения наблюдавшейся скорости синтеза. Общий итог этих работ отрицательный. Более того, из весьма общих соображений, основанных на анализе связи ${}^4\text{He}$ в металлах, были получены жесткие ограничения на возможные эффекты усиления экранирования dd-кулоновского барьера в металлах в равновесном состоянии [19].

Среди моделей, претендующих на объяснение всей совокупности экспериментов по НТС, можно выделить две категории.

В одной из них общей чертой является предположение о тех или специфических Квантовомеханических эффектах в кристаллической решетке, приводящих к существенному увеличению скорости синтеза. В некоторых моделях центральное место занимает периодический характер межатомных полей в кристаллах, в других — специфические условия в отдельных областях решетки — дефектах, зонах "квантовоэлектродинамического конфайнмента" и т.п. К сожалению, как показано в [17], все известные нам работы данного типа оказываются некорректными с теоретической точки зрения и, следовательно, не могут быть использованы для объяснения НТС.

В основе моделей другой группы лежат весьма экзотические предположения, которые в настоящее время довольно трудно проверить. Примером является гипотеза о существовании новых очень тяжелых стабильных частиц, осуществляющих катализ НТС (по аналогии с мюонным катализом). Хотя, в принципе, эта гипотеза и может иметь право на существование, вместе с тем, стремление объяснить непонятный механизм НТС с помощью еще более экзотических объектов может вызывать неудовлетворение, тем более, что многие свойства таких частиц не фиксируются имеющимися моделями. Это оставляет широкий простор их авторам для игры, правила которой они устанавливают сами. В этом смысле, например, модель катализа тяжелыми частицами может рассчитывать на серьезное отношение, либо если подобные частицы будут экспериментально обнаружены, либо если будут сформулированы достаточно обоснованные и жесткие критические тесты для НТС, устраняющие произвол предсказаний.

Более "умеренной" является гипотеза о существовании некоторой метастабильной компаунд-системы двух дейтонов, возникновение которой предшествует ядерному синтезу. Подобные системы могли бы образовываться за счет электромагнитных сил (в решетке) или ядерных взаимодействий и увеличивать скорость синтеза.

В действительности не видно никаких оснований для существования "бидерного атома" $(D^+D^+)2e^-$ или "сверхсвязанного состояния" $(D_2^+)^*$. Если вместо наводящих соображений использовать точное решение для данных систем, то приходим к гладкому потенциалу, не содержащему метастабильных уровней. Как было показано в [20], существующие данные по сечениям dd- и dT-реакций достаточны, чтобы получить надежную экстраполяцию к предельно малым энергиям и исключить влияние гипотетических ядерных резонансов, которые могли бы объяснить наблюдаемые скорости НТС.

К числу наиболее "естественных" и разработанных относятся "ускорительные" модели (см. [1]). В их основе лежит идея о преодолении кулоновского барьера, за счет энергии, приобретаемой ионами дейтерия при их ускорении в различных процессах в решетке или на поверхности образцов. Таким образом, ускорительные модели принадлежат к категории "горячих", с характерными энергиями $\sim 10^2 - 10^4$ эВ.

Ускорительные модели имеют ряд проблем, связанных с необходимостью сильных полей в трещинах и соотношением временных масштабов, характеризующих различные конкурирующие процессы, но эти проблемы, по-видимому, могут быть преодолены в рамках довольно естественных предположений, допускающих экспериментальную проверку [1]. В рамках этих моделей удается качественно объяснить все наблюдаемые особенности нейтронного излучения и количественно согласовать ее скорость с амплитудами "сопровождающих" сигналов электромагнитной и акустической эмиссии. Однако ни огромное преобладание трития (или гелия), ни избыточное тепловыделение не могут быть описаны в рамках ускорительного механизма.

6. Заключение

Приведенные выше результаты ряда недавних экспериментов по регистрации продуктов НТС и некоторых попыток теоретического описания механизма НТС, как нам кажется, подтверждают оценку ситуации, данную во введении: исследования по НТС все еще находятся в той стадии, когда преждевременно делать окончательные выводы.

Наиболее достоверными представляются наблюдения слабой аномальной нейтронной эмиссии (в среднем на "уровне Джонса"). Лучшие эксперименты этой категории выполнены с использованием современной ядернофизической техники и тщательным анализом различных источников помех и ложных эффектов. Их результаты, по-видимому, не вызывают особых сомнений. Однако все еще не найдены условия, однозначно гарантирующие возникновение этой эмиссии, которая наблюдается лишь в небольшом числе исследованных образцов.

Менее определенной является ситуация с регистрацией трития и гелия. Хотя присутствие этих изотопов в опытах по НТС установлено достаточно надежно, пока нельзя полностью исключить ложные эффекты, обусловленные локализованными примесями в исходных материалах и подхватом из окружающей среды.

Не удалось достичь и теоретического описания НТС, которое объясняло бы всю совокупность данных, полученных различными экспериментальными группами. Возможно, рано или поздно такое объяснение будет найдено. Не исключено, однако, что подобное положение не случайно и отражает противоречивость и некорректность какой-то части экспериментов. В этой связи еще раз подчеркнем, что известные нам модели, претендующие на объяснение избыточного тепловыделения и $T/n \gg 1$, либо неудовлетворительны с теоретической точки зрения, либо основаны на весьма экзотических предположениях, не имеющих экспериментальных обоснований, что делает их малореалистичными. Из известных моделей фактически лишь модели ускорительного типа являются достаточно простыми и естественными и не требуют введения новой физики. Но

такие модели могут объяснить лишь аномальные ядерные явления низкой интенсивности, не приводящие к избыточному тепловыделению и $T/n \sim 1$. Сводятся ли в действительности явление НТС только к этим эффектам, или реально существуют и такие необычные эффекты, как избыточное тепловыделение и преобладание трития и гелия, — должны показать дальнейшие прецизионные измерения.

ПРИМЕЧАНИЕ

⁽¹⁾ В 1991 г. по проблематике НТС были проведены две конференции (в марте в Дубне и в июне — июле в Комо, Италия) и два рабочих совещания (в ноябре в Екатеринбурге и в декабре в Хаф-МунБэй, Калифорния, США).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Царев В.А. // УФН. 1990. Т. 160, вып. 11. С. 1.
2. Srinivasan M. // Current Science, India. April 25. 1991.
3. White C. The Cold Fusion Revolution // 21 st Century. Fall 1991. P. 25.
4. Моррисон Д.Р.О. // УФН, 1991. Т.161, № 12. С. 129.
5. Menlove H.O., Paciotti M.A., Claytor T.N. et al // Proc. of the Second Annual Conference on Cold Fusion (ACCF2). Como, Italy, June 20 — July 4 1991. — P. 385; Talk at the Workshop "Review of EPRI Research in Anomalous Nuclear Measurements in Deuterium-Metal Systems" (REPRIR). — Half Moon Bay, California, December 8—11,1991.
6. Wolf K. // Talk at the REPRIR; Proc. of the Conference "Anomalous Nuclear Effects in Deuterium-Solid Systems" (ANEDSS). — Provo, USA, October 22—24, 1990. — P. 552.
7. Artukhov V.I., Bistritskii V.M., Gilev A.I. et al // JINR preprints D15-91-289, D15-91-290. — Dubna. 1991.
8. Царев В.А. // УФН. 1991. Т. 161, №4. С. 152.
- Tsarev V.A., Worledge D.H. // Fusion Technology. 1992.
9. Jones S. Talk at the REPRIR.
10. Claytor T.N. Talk at the REPRIR; Proc. of the ACCF2. — P. 395.
- [11] Chien C.C., Hodko D., Minevski Z., Bockris J. Preprint Texas A&M University. — 1991.
12. Storms E. // Fusion Technology. 1991. V 20. P. 433.
13. Cedzynska K., Barrowes S.C., Bergeson H.E. et al. // Proc of the ANEDSS. — P. 463.
14. Bush B.F., Lagowski J.J., Miles M.H. et al. // J. Electroanal. Chem. 1991. V. 304. P. 271.
15. Liaw B.Y., Tao P.L., Turner P. et al II Proc. of the ACCF2. — P. 55.
16. Oliver B., Hoffman N. Talk at the REPRIR.
17. Chechin V.A., Tsarev V.A., Rabinovitz M. Submitted to Fusion Technology.
18. Bockris J., Lin G.H., Packman N.J. Fusion Technology. 1990. V. 18. P.11.
- Scaramuzzi F. // Lectures at the Course on Status and Perspectives of Nuclear Energy: Fission and Fusion. — Varenna, Italy, July 1990.
- Preparata J. // Proc of the First Annual Conference on Cold Fusion (ACCF1). — Salt Lake City, (USA), 1990; Proc. of the ACCF2. — P. 453.
19. Lagget A.J., Baum G. // Nature. 1989. V. 340. P. 45; Phys. Rev. Lett. 1989. V. 63 . — P. 191.
20. Zakowicz W., Rafelski J. // Proc. of the ANEDSS. — P. 911.

Статья поступила 27.04.92 г.