

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

3-94-34

ВОЙНОВ

Александр Владимирович

УДК 539.172.3/4

НЕСТАТИСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В КАСКАДНОМ
 γ -РАСПАДЕ КОМПАУНД-СОСТОЯНИЙ
ЧЕТНО-ЧЕТНЫХ ЯДЕР

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

Научный руководитель -
кандидат физико - математических наук,
старший научный сотрудник

А.М.Суховой

Официальные оппоненты:

доктор физико - математических наук,
профессор
доктор физико - математических наук,
главный научный сотрудник

В.Г.Калининков

Г.В.Мурадян

Ведущее предприятие: Санкт-Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Ленинградская обл.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1994 г. в "___" час на заседании специализированного совета Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, Дубна Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

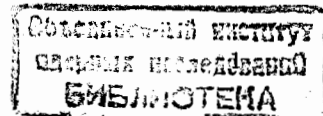
Ю.В.Таран

Общая характеристика работы

АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящее время большое количество экспериментальных данных, полученных с помощью современных методик для тяжелых деформированных ядер, показывает, что статистическая интерпретация структур уровней ядер с энергиями от нуля до энергии связи нейтрона и выше, является сильно упрощенной, что необходимо принимать во внимание выделенные моды, характеризующие квазичастичными, коллективными и т.д. степенями свободы. Развитие методики изучения каскадного γ - распада ядер на тепловых нейтронах показало, что данное замечание справедливо и для реакции радиационного захвата нейтронов. Было показано, что интенсивности каскадов, заселяющие первые возбужденные состояния не удается описать простой статистической моделью распада компаунд - состояний ядер из - за влияния структур состояний на ширины первичных и вторичных переходов. Новые экспериментальные возможности открыли новые перспективы изучения структур этих состояний. К настоящему времени накоплен экспериментальный материал по каскадному распаду 11-ти четно - нечетных тяжелых деформированных ядер и 5-ти четно - четных. Полученная информация свидетельствует о нетривиальности закономерностей каскадного γ -распада и требует дальнейшего экспериментального исследования.

ЦЕЛЬЮ ДАННОЙ РАБОТЫ ЯВЛЯЕТСЯ:

1. Исследование особенностей каскадного γ -распада четно - четных составных ядер из области $4s$ максимума нейтронной силовой функции.



2. Анализ экспериментальных данных с целью получения информации о структуре состояний, заселяемых каскадными переходами.
3. Поиск закономерностей, не укладывающихся в традиционные рамки статистического механизма образования и распада ядер.
4. Качественная оценка соответствия наблюдаемых экспериментальных закономерностей теоретическим представлениям.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ.

В настоящей работе впервые проведено исследование каскадного гамма-распада компаунд - состояний четно-четных ядер ^{146}Nd , ^{150}Sm , ^{156}Gd , ^{158}Gd , ^{164}Dy , ^{174}Yb , образованных при захвате тепловых нейтронов. Полученная экспериментальная информация, а также результаты ее анализа могут способствовать более глубокому пониманию процессов, определяющих свойства ядер при низких энергиях возбуждения.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ:

1. Методом САСИ получены спектры двухквантовых каскадов, разряжающих компаунд-состояния ядер ^{146}Nd , ^{150}Sm , ^{156}Gd , ^{158}Gd , ^{164}Dy , ^{174}Yb , образовавшиеся при радиационном захвате тепловых нейтронов. Определены энергии квантов и интенсивности наиболее сильных каскадов.
2. Получена новая информация о схемах распада исследуемых ядер в широком энергетическом интервале $E \leq 3,5$ МэВ.
3. С помощью предложенной в диссертации методики определен порядок следования γ - квантов в каскадах и получены распределе-

ния интенсивностей каскадных переходов в функции энергии возбуждения ядра. Обнаружены локальные усиления интенсивностей каскадов, для ядер ^{156}Gd , ^{158}Gd и ^{164}Dy в районе энергии их первичных переходов от 2 до 3 МэВ. Дана качественная интерпретация наблюдаемого эффекта.

4. Проанализированы корреляции интенсивностей первичных переходов для ядер ^{168}Er , ^{174}Yb и ^{178}Hf при захвате тепловых нейтронов и нейтронов со средней энергией $E_n = 2$ кэВ. Обнаружены значимые корреляции для ядер ^{168}Er и ^{174}Yb .
5. Проведен поиск эквидистантности в положениях промежуточных уровней интенсивных двухквантовых каскадов для измеренных к настоящему времени четно-четных и четно-нечетных ядер.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы, положенные в основу диссертации докладывались на 43-м международном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Дубна, 1993 г.), на международной конференции "Будущее ядерной спектроскопии" (Крит, Греция, 1993).

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Объем работы - 110 страниц машинописного текста, 10 таблиц и 19 рисунков. Список литературы включает 67 наименований.

ПУБЛИКАЦИИ. По материалам диссертации опубликовано 9 работ.

Содержание работы

Во введении показана актуальность работы, ее цель, кратко изложено содержание диссертации и приведены основные положения, выпол-

симые на защиту.

В первой главе дан обзор некоторых теоретических моделей, используемых в настоящее время для описания γ - распада компаунд - состояний ядер, а также моделей, предсказывающих существование выделенных мод возбуждения в области энергий $0 - B_n$, наблюдаемых экспериментально в реакциях неупругого рассеяния электронов, протонов и γ - квантов, т.к. представляет интерес влияние этих мод на свойства каскадного γ - распада.

Дан краткий обзор методический приемов анализа нестатистических эффектов в (n, γ) реакциях, показаны их недостатки.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию каскадных переходов в четно - четных ядрах ^{146}Nd , ^{150}Sm , ^{156}Gd , ^{158}Gd , ^{164}Dy , ^{174}Yb . С помощью разработанной в ЛНФ ОИЯИ методики регистрации сумм амплитуд совпадающих импульсов с двух $\text{Ge}(\text{Li})$ детекторов выделены двухквантовые каскады, заселяющие нижние уровни 0^+ , 2^+ , 4^+ ротационной полосы основного состояния этих ядер. Определены абсолютные интенсивности этих каскадов и энергии промежуточных уровней. Экспериментальные значения сумм интенсивностей каскадов сравнивались с теоретическими для каждого заселяемого каскадами нижнего уровня. Теоретические значения были рассчитаны на основе статистической модели распада компаунд - состояний ядер. При расчете использовались две модели плотностей уровней - модель Ферми - газа с "обратным смещением" и модель Игнатюка. Сравнение показывает, что наблюдается систематическое превышение экспериментальных значений интенсивностей над расчетными, что связывается с наличием сильных "нестатистических" каскадов.

С помощью предложенной методики проведено разложение дифференциальных спектров совпадений на первичные и вторичные γ - переходы и построены зависимости интенсивностей каскадов от энергии их первичных переходов. Эти зависимости приведены на рис 1. Здесь же приведены расчетные кривые, полученные на основе статистической модели распада компаунд - состояний ядер при использовании двух моделей плотности уровней.

Из рисунков видно что ни одна из моделей не может адекватно описать экспериментально наблюдаемые распределения интенсивностей каскадов. Общепринятая модель ферми - газа с "обратным смещением" не в состоянии правильно предсказать усиление каскадных переходов, соответствующих наблюдаемым максимумам в распределениях при энергии первичного перехода 2-3 МэВ (что соответствует энергии возбуждения ядра 5 - 6 МэВ). Подобие форм распределений для ядер ^{156}Gd , ^{158}Gd , ^{164}Dy , исключает возможность интерпретации усиления интенсивности каскадов при энергии первичных переходов 2 - 3 МэВ с позиции случайных (портер - томасовских) флуктуаций.

Чисто качественно подобное усиление интенсивностей каскадов в районе энергий возбуждения ядра 5 - 6 МэВ объясняется за счет одночастичных переходов $4s - 3p$ между соответствующими нейтронными подболочками.

В настоящее время интенсивно изучаются магнитные и электрические дипольные возбуждения в ядрах с помощью различных типов ядерных реакций. Так как в изученных ядрах 1^+ и (1^-) состояния могут заселяться каскадными переходами, в данной работе приведено сравнение характеристик уровней, выделенных в (γ, γ') реакциях и получен-

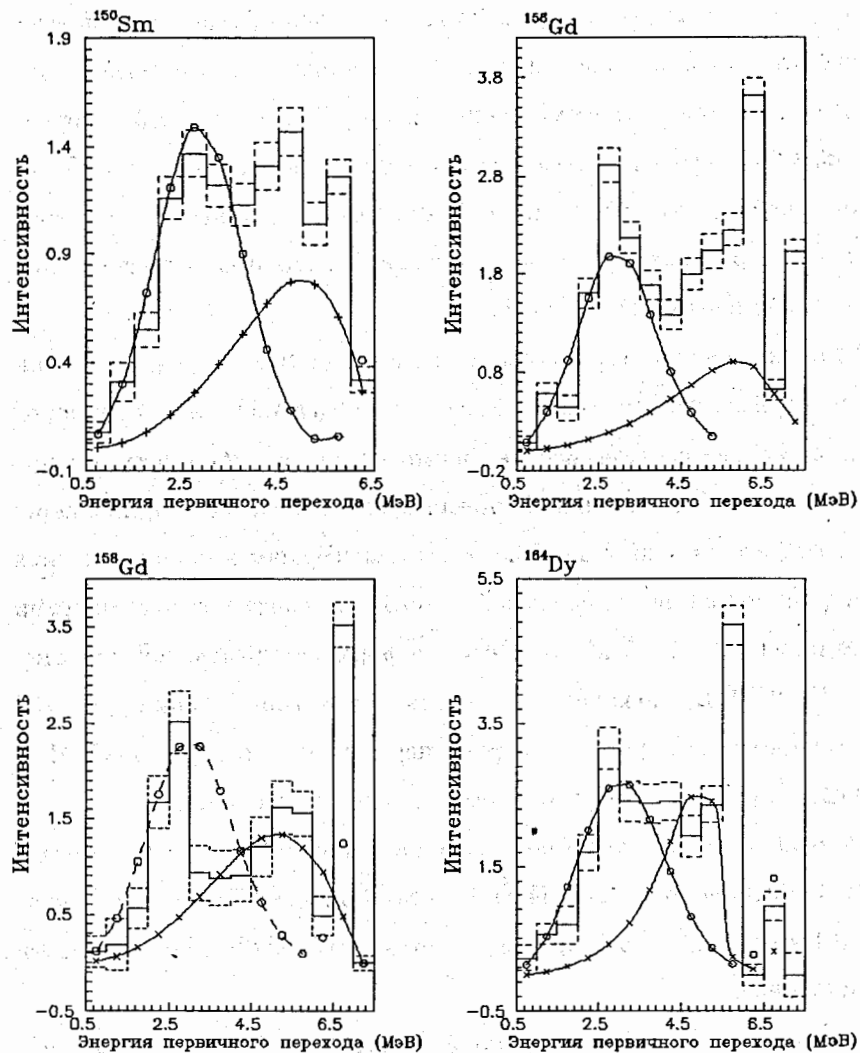


Рис 1. Зависимость суммарной абсолютной интенсивности каскадов заканчивающихся тремя низколежащими уровнями ($J^\pi = 0^+, 2^+$ и 4^+), от энергии первичного перехода. x - расчет с использованием модели ферми газа с "обратным смещением", o - модели Игнатьюка. Пунктиром выделены статистические ошибки эксперимента.

ных при исследовании каскадного γ -распада. В качестве характеристик уровней, возбуждаемых в реакциях были выбраны коэффициенты ветвления $R = I(2^+)/I(0^+)$, т.к. согласно правилам Алаги данный коэффициент в ряде случаев позволяет определить значение квантового числа K^π для уровней, при распаде которых заселяются состояния $0^+, 2^+ \dots$. Из сравнения положений наблюдаемых уровней можно сделать следующий вывод: каскадами γ -переходов возбуждаются только относительно малая часть найденных к настоящему времени состояний фрагментированного ГМДР ("scissor modes") и такая же или большая доля уровней 1^- . В значениях R основной части каскадных переходов наблюдается большой разброс, что не позволяет интерпретировать их как "чистые" состояния с фиксированным значением K .

В третьей главе предложена методика анализа корреляций первичных γ -переходов при распаде различных резонансов деформированных ядер в широком диапазоне энергий γ -переходов.

В этой главе демонстрируется следующее: во-первых, распределение интенсивностей γ -переходов, усредненных по интервалу 100 кэВ, как для тепловых, так и для резонансных нейтронов имеет четко выраженную структуру, во-вторых, имеет место достаточно хорошая корреляция положения максимумов этих структур (рис 2-4). Неслучайный характер такой структуры доказывается с помощью анализа корреляций интенсивностей первичных переходов при захвате тепловых нейтронов и нейтронов с "усреднением" по резонансам со средней энергией $E_n = 2$ кэВ.

Предполагается, что наличие положительной корреляции в этом случае будет свидетельствовать о присутствии нестатистических меха-

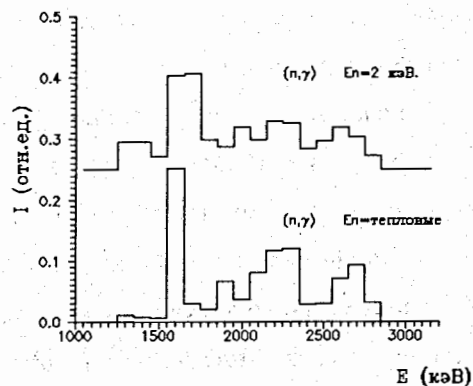


Рис 2. Распределение усредненной по интервалу 100 кэВ наблюдаемой интенсивности первичных переходов для ядра ^{174}Yb .

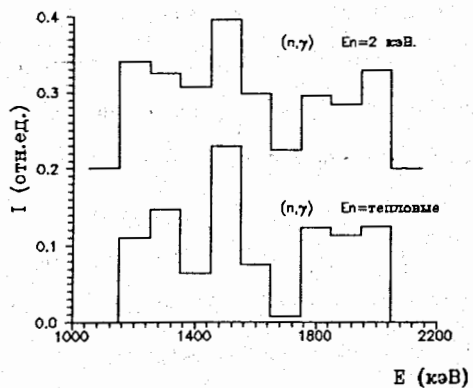


Рис 3. Распределение усредненной по интервалу 100 кэВ наблюдаемой интенсивности первичных переходов для ядра ^{178}Hf .

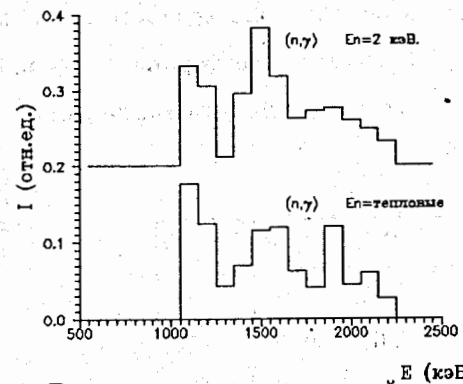


Рис 4. Распределение усредненной по интервалу 100 кэВ наблюдаемой интенсивности первичных переходов для ядра ^{168}Er .

низмов, ответственных за возникновение подобных структур.

В отличие от других подобных методик предложенная методика анализа корреляции не предполагает известность спинов и четностей заселяемых анализируемыми переходами уровней, и, следовательно, мультипольностей переходов.

Были проанализированы первичные переходы при захвате тепловых нейтронов и нейтронов со средней энергией 2 кэВ в ядрах ^{168}Er , ^{174}Yb и ^{178}Hf . Результаты анализа корреляций переходов сведены в таблицу 1. Значимые значения корреляции для ядер ^{168}Er , ^{174}Yb позволяют сделать заключения о наличии нестатистического эффекта, связанного с наличием одних и тех же выделенных компонент волновой функции в разных компаунд - состояниях.

В четвертой главе проделан анализ ранее полученной экспериментальной информации по каскадным переходам как в четно - четных так и в четно - нечетных ядрах на предмет наличия выделенной эк-

Таблица 1. $N^{\text{экс}}$ - количество экспериментальных переходов, заселяющих одни и те же состояния в случае захвата тепловых и резонансных нейтронов; $R^{\text{экс}}$ - экспериментальное значение коэффициента корреляции; R - среднее расчетное значение коэффициента корреляции; P - статистическая достоверность $R^{\text{экс}}$.

		^{174}Yb	^{168}Er	^{178}Hf
$N^{\text{экс}}$		42	45	27
$R^{\text{экс}}$		0.61	0.75	0.54
R	методика 1	-	0.27	0.30
P	- " -	-	0.99	0.93
R	методика 2	0.29	0.32	0.36
P	- " -	0.96	0.99	0.80

видистантности в положениях промежуточных уровней интенсивных каскадов. Яркий пример наличия эквидистантности показан на рис 5. Аналогичную эквидистантность можно выделить практически во всех, полученных к настоящему времени, распределениях интенсивностей каскадов для ядер, отличающихся такими параметрами, как четность числа нейтронов или деформация.

Для анализа эквидистантности использовался функционал $F(T)$:

$$F(T) = \sum_i S_i S_j \left[\frac{(S_i - S_j)^2}{\langle S^2 \rangle} \right] \frac{\Gamma^2 \delta E_{ij}^2}{\Gamma^2 \delta E_{ij}^2 + (\delta E_{ij}^2 - T^2)^2} + \sum_j S_j S_k \left[\frac{(S_j - S_k)^2}{\langle S^2 \rangle} \right] \frac{\Gamma^2 \delta E_{jk}^2}{\Gamma^2 \delta E_{jk}^2 + (\delta E_{jk}^2 - T^2)^2}$$

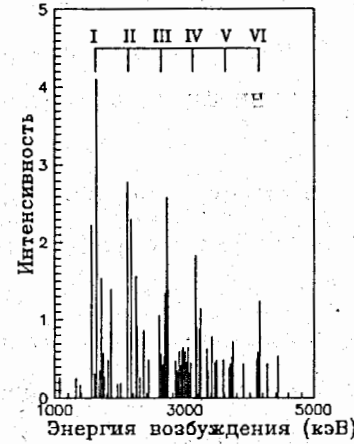


Рис 5. Зависимость абсолютной интенсивности двухквантовых каскадов на первое возбужденное состояние ^{174}Yb в функции энергии возбуждения. Римскими цифрами помечены вероятные группы эквидистантных состояний.

$$S_k S_i \left[\frac{(S_i + S_k - 2S_j)^2}{\langle S^2 \rangle} - \frac{(\delta E_{ij} - \delta E_{jk})^2}{\Gamma^2} \right] \frac{\Gamma^2 \delta E_{ij}^2}{\Gamma^2 \delta E_{ik}^2 + (\delta E_{ik}^2 - 4T^2)^2} \quad (1)$$

Здесь: T - период эквидистантности; S - интенсивность каскада номер i, j и k ; $\langle S \rangle$ - средняя интенсивность анализируемого набора каскадов, δE - разность энергий возбуждения промежуточных уровней двух рассматриваемых каскадов; $\Gamma = 0, 1T$ - коэффициент, регулирующий величину вклада данного каскада в функционал (1). Для данного тестируемого значения T каскад k выбирается так, чтобы функционал (1) был бы максимальным для данной пары каскадов i и j .

Наличие (отсутствие) выделенного периода T определяется по наличию (отсутствию) четко выраженного максимума в зависимости F от варьируемой переменной T .

Эффективность используемого функционала была апробирована на следующей модели:

а) конструировалось $N = 25 - 30$ "полос" эквидистантных каскадов, содержащих по $m=4$ или 3 члена в каждой эквидистантной "полосе";

б) интенсивности в полосах менялись случайно от максимальной до минимальной умножением предыдущего значения данной "полосы" на случайную величину $\xi < 1$;

в) интервал T между двумя членами моделируемой "полосы" искажается прибавлением к каждому значению энергии случайной нормально распределенной ошибки с дисперсией σ^2 ;

г) закон изменения интенсивностей членов различных полос выбирался так, чтобы в целом воспроизвести общую форму распределений интенсивностей экспериментально наблюдаемых каскадов.

Из моделирования следует, что искомый период эквидистантности может быть однозначно выделен из подобных наборов при достаточно малых значениях произведения Nm (например, равном 100). Такое число уровней характерно для практически всех изученных ядер. Но подобный функционал позволяет однозначно определять имеющийся период эквидистантности не во всех случаях. Тем не менее, для четно-четных ядер во многих случаях можно выделить одно значение интервала эквидистантности. И это значение (ярко выраженное в ряде случаев) изменяется в интервале $500 < T < 800$ кэВ.

Интерпретация полученных значений периодов эквидистантности T для четно-нечетных ядер, а также для ядер ^{168}Er и ^{180}Hf (отличающихся от остальных изученных четно-четных ядер мультипольностью каскадных переходов) предполагает, что значение T также зависит от структуры возбуждаемых в реакции (n, γ) компаунд-состояний. Мерой "одночастичности" для этих состояний может служить

отношение приведенной нейтронной ширины Γ_n^0 к ее среднему значению $\langle \Gamma_n^0 \rangle$.

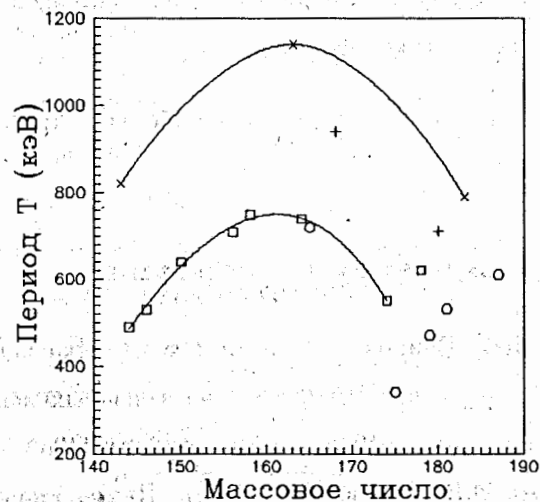


Рис 6. Зависимость значения наиболее вероятного периода эквидистантности от атомного веса изученных ядер:

□ - четно - четные ядра

○ - четно - нечетные ядра с $\Gamma_n^0 / \langle \Gamma_n^0 \rangle \geq 1$

× - четно - нечетные ядра с $\Gamma_n^0 / \langle \Gamma_n^0 \rangle \ll 1$

+ - ядра ^{168}Er и ^{180}Hf

Гладкими линиями соединены минимальные и максимальные значения.

С теоретической точки зрения наблюдаемая эквидистантность в энергетических распределениях интенсивности каскадов могла бы быть понята (чисто качественно) в рамках Модели взаимодействующих бозонов, как интенсивное возбуждение каскадными переходами уровней ядер, отличающихся друг от друга по своей структуре только числом

фононов. При этом следует предположить, что наличие фонона, энергия которого порядка 0,5 – 1,0 МэВ, не изменяет существенно величину матричного элемента первичного и вторичного переходов каскадов, если эти каскады возбуждают промежуточные уровни одинаковой структуры, отличающиеся числом таких фононов.

В заключении дается краткая характеристика работы и приводятся ее основные результаты.

Работы, положенные в основу диссертации.

1. Бонева С.Т., Васильева Э.В., Войнов А.В. и др. Схема γ -распада компаунд-состояния ^{146}Nd из реакции $^{145}\text{Nd}(n, 2\gamma)$ на тепловых нейтронах // Изв. АН СССР. Сер. Физ. - 1989. - Т.53. - С.2401-2406.
2. Бонева С.Т., Васильева Э.В., Войнов А.В. и др. Интенсивные двухквантовые каскады и схема распада компаунд-состояния ^{174}Yb // Изв. АН СССР. Сер. Физ. - 1989. - Т.53. - С.2092-2105.
3. Васильева Э.В., Войнов А.В., Кестарова О.Д. и др. Двухквантовые каскады захвата тепловых нейтронов в ^{149}Sm // Изв. РАН. Сер. физ. - Т.57, N9. - 1993. - С.128-138.
4. Васильева Э.В., Войнов А.В., Кестарова О.Д. и др. Каскадный γ -распад компаунд-состояния ^{156}Gd // Изв. РАН. Сер. физ. - Т.57, N10. - 1993. - С.98-108.
5. Васильева Э.В., Войнов А.В., Кестарова О.Д. и др. Интенсивные двухквантовые каскады и схема распада компаунд-состояния ^{164}Dy // Изв. РАН. Сер. физ. - Т.57, N10. - 1993. С.109-118.

6. Ali M.A., Bogdzel A.A., Khitrov V.A., Kholnov Yu.V., ... Vojnov A.V. et al. Intense two - step cascades of ^{158}Gd compound - state decay: JINR communication. - Dubna, 1991. - E3-91-428. - 22p.

7. Васильева Э.В., Войнов А.В., Кестарова О.Д. и др. Возможная эквидистантность энергий возбуждения промежуточных уровней интенсивных γ -каскадов // Изв. РАН. Сер. физ. - Т.57, N9. - 1993. - С.118-127.

8. Boneva S.T, Sukhovej A.M., Khitrov V.A, Vojnov A.V. Intensities of two - quanta cascades at different excitation energies of compound nuclei ^{146}Nd , ^{174}Yb and ^{183}W // Z.Phys. - A338. - 1991. - P.319-323.

9. Васильева Э.В., Войнов А.В., Кулик В.Д. и др. Методика нестатистического поведения радиационной силовой функции при захвате тепловых и резонансных нейтронов. // Ядерная Физика. - 1993. - Т.56. - С.13-22.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 февраля 1994 года.