

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Беспалова Ольга Викторовна

**ОДНОЧАСТИЧНАЯ СТРУКТУРА ЯДЕР
В МОДЕЛИ СРЕДНЕГО ПОЛЯ
С ДИСПЕРСИОННЫМ ОПТИЧЕСКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ**

Специальность 01.04.16

Автореферат диссертации на соискание степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2020 г.

Работа выполнена в отделе ядерных реакций Научно-исследовательского
института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

- Официальные оппоненты**
- **Блохинцев Леонид Дмитриевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, НИИЯФ МГУ, главный
научный сотрудник
 - **Демьянова Алла Сергеевна,**
доктор физико-математических наук,
ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»,
начальник лаборатории
 - **Самарин Вячеслав Владимирович,**
доктор физико-математических наук,
доцент, ММО ОИЯИ, ведущий научный
сотрудник

Защита диссертации состоится “18” сентября 2020 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.11 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 19-й корпус МГУ, аудитория 2-15, Ленинские горы, д 1, стр. 5, 119991, Москва.

С диссертацией, а также со сведениями о регистрации участия в удаленном интерактивном режиме в защите можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/291948687/>

Автореферат разослан «_» _____ 2020 г.

Телефон совета для справок: +7(495)939-58-69

Электронная почта совета для справок: galan_lidiya@mail.ru

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее разработанности

Диссертация посвящена одной из самых актуальных задач современной ядерной физики – исследованию свойств нейтронно- (протонно-) избыточных ядер вплоть до границ нуклонной стабильности. Развитие техники ускорения пучков нестабильных ионов открыло перед физиками новую область исследований и сделало изучение свойств ядер, удаленных от долины бета-стабильности, одной из наиболее интригующих областей современной ядерной физики. Эксперимент показал, что структура таких ядер существенно отличается от структуры стабильных ядер. Был обнаружен целый ряд новых свойств и среди них: исчезновение традиционных и появление новых магических чисел; изменение последовательности заполнения оболочек; нейтронное и протонное гало; новые области деформации и т.д. Основные экспериментальные данные получены для легких нейтронно-избыточных ядер, для которых практически достигнута граница нейтронной стабильности. Такие данные послужили вызовом для моделей ядра и стимулировали их развитие, сделав их предсказания чрезвычайно востребованными. С ростом числа протонов достигнуть этой границы в эксперименте становится все труднее. Поэтому теоретические предсказания для нейтронно-избыточных ядер средней и тяжелой атомной массы приобретают особую актуальность и ценность. Появление новых свойств таких ядер связывается с эволюцией структуры ядер при изменении в них числа нейтронов (протонов). Основные предсказания выполнены в рамках многочастичной оболочечной модели и модели среднего поля (релятивистской и нерелятивистской) с учетом парных корреляций. Показана важность учета тензорного взаимодействия, деформаций, зависимости спин-орбитального взаимодействия от плотности для ядер, удаленных от границы β -стабильности.

Цели и задачи. Основная цель диссертационной работы – исследовать эволюцию одночастичной структуры ядер среднего и тяжелого атомного веса, проследить за проявлением в одночастичных характеристиках ядер признаков традиционных и за возникновением новых магических чисел при изменении числа нуклонов в направлении и вплоть до границ нуклонной стабильности. Особое внимание уделяется эволюции нейтронной структуры нейтронно-избыточных ядер, т.к. нейтронная граница стабильности достигается при существенно большем избытке нейтронов, чем протонная – при протонном избытке. При этом одной из целей исследования стало прояснение влияния на эволюцию глобальных зависимостей среднего поля, оболочечного и корреляционных эффектов.

Для достижения этих целей были сформулированы следующие задачи.

1. Разработать систематику глобальных параметров составляющей дисперсионного оптического потенциала (ДОП) хартри-фоковского типа (далее хартри-фоковской составляющей) для описания и предсказания одночастичных характеристик стабильных близких к сферическим ядер среднего и тяжелого атомного веса с $40 \leq A \leq 208$.
2. Разработать новый метод конструирования ДОП, применимый для предсказательного расчета одночастичных характеристик нестабильных близких к сферическим ядер среднего и тяжелого атомного веса вплоть до границы нейтронной стабильности.
3. Выполнить расчет одночастичных характеристик нейтронно- (протонно-) избыточных ядер среднего и тяжелого атомного веса в направлении (или вплоть до) границы нейтронной стабильности по дисперсионной оптической модели с использованием разработанного нового метода конструирования его потенциала.
4. Проследить динамику традиционных $N = 20, 28, 50, 82$ и нетрадиционных $N = 16, 26, 32, 34, 40, 56$ магических чисел и исследовать

особенности эволюции расчетных одночастичных спектров ядер вблизи границы нейтронной стабильности.

Объект и предмет исследования

Объектом изучения в настоящей работе является одночастичная структура атомных ядер, а в качестве предмета – ее изменение (эволюция) при приближении числа нейтронов (протонов) к границам нуклонной стабильности на примере четно-четных близких к сферическим ядер от Si до Pb.

Методология исследования

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены в дисперсионной оптической модели (ДОМ). Эта модель позволяет вычислять сечения рассеяния нуклонов ядрами и их одночастичные свойства в рамках единого подхода, а ее потенциал учитывает влияние на одночастичные характеристики ядра нуклонных корреляций, что важно для ядер, удаленных от долины β -стабильности.

Для расчетов сечений упругого рассеяния нуклонов ядрами, полных сечений реакций и взаимодействия была использована программа SPIGENOA [1], модифицированная в НИИЯФ МГУ под потребности ДОМ, заключающиеся во включении в оптический потенциал дисперсионных составляющих. Для расчета одночастичных энергий ядер была использована программа DWUCK4 [2], также модифицированная в НИИЯФ МГУ под потребности ДОМ. Обе программы хорошо апробированы и широко используются в расчетах сечений рассеяния и передачи нуклона.

Для расчета энергетических зависимостей ДОП была создана программа Disp [Б1], а для расчета оригинальных глобальных параметров ДОП – программа GLOB [Б2], на которые автором диссертации получены 2 свидетельства о праве собственности. Вычисление других одночастичных характеристик ядер (вероятностей заполнения одночастичных орбит, фрагментации

онных ширин, спектроскопических факторов и спектральных функций, среднеквадратичных радиусов орбит и распределения плотности) было выполнено по программам *Vost* (созданной автором диссертации) и *Spectr* (автор А.А. Климочкина).

Научная новизна

Предсказания эволюции нейтронной и протонной одночастичных характеристик широкого круга ядер от Si до Pb в направлении границы нейтронной стабильности по дисперсионной оптической модели выполнены впервые. Ранее основные результаты были получены в различных вариантах оболочечной модели и модели среднего поля (нерелятивистской и релятивистской).

Был разработан новый метод конструирования дисперсионного оптического потенциала для ядер среднего и тяжелого атомного веса, реализующий физически обоснованную экстраполяцию параметров ДОП на область ядер за пределами долины β -стабильности. Такая экстраполяция также была выполнена впервые.

Получена новая теоретическая информация о предпосылках эволюции одночастичной структуры и формирования ее особенностей в нейтронно-избыточных ядрах, обусловленных средним полем с дисперсионной составляющей.

Новой является разработанная систематика глобальных параметров хартри-фоковской составляющей ДОП, применимая для сферических и близких к ним ядер с A от 40 до 208 в диапазоне энергии $-70 \leq E \leq +70$ МэВ.

Научная и практическая значимость

В результате проведенного исследования получена ценная теоретическая информация, позволившая прояснить влияние среднего поля ядра, обо-

лочечного и корреляционных эффектов на эволюцию одночастичной структуры ядер среднего и тяжелого атомного веса вблизи границы нейтронной стабильности и динамику магических чисел.

В диссертационной работе продемонстрирована высокая предсказательная возможность дисперсионной оптической модели, которая позволяет использовать ее для интерпретации экспериментальных данных для ядер вблизи границы нейтронной стабильности. Высокая предсказательная способность явилась результатом разработанных нового способа конструирования ДОП и одной из первых систематик глобальных параметров хартрифоксовской составляющей ДОП.

Полученные результаты важны для развития представлений об эволюции структуры ядер, для постановки будущих экспериментов по ускорению пучков нестабильных ядер, для практических расчетов в ядерной физике, астрофизике, требующих знания особенностей одночастичной структуры атомных ядер.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечена использованием современного дисперсионного подхода к определению параметров нуклон-ядерного оптического потенциала. Этот подход обеспечивает возможность эффективно учесть влияние оболочечного и корреляционных эффектов как сконцентрированных на поверхности, так и распределенных по объему. В НИИЯФ МГУ накоплен многолетний опыт успешного применения дисперсионной оптической модели для описания и предсказания одночастичных свойств широкого круга ядер. Достоверность подтверждается достигнутым хорошим согласием с имеющимися экспериментальными данными о параметрах оболочечной структуры исследованных стабильных ядер и с рядом предсказаний в рамках других теоретических подходов для нестабильных ядер.

Личный вклад автора в работах по теме диссертации, выполненных с соавторами, заключается в постановке задачи об исследовании эволюции одночастичной структуры ядер при изменении числа нейтронов и протонов в направлении границ нуклонной стабильности, разработке метода конструирования ДОП для таких ядер, создании одной из первых систематик глобальных параметров ДОП, выполнении большей части расчетов, результаты которых вошли в диссертацию. Соискатель является единственным автором в одной статье по теме диссертации, а также единственным автором 3 программных продуктов, использованных при подготовке диссертации.

Апробация результатов

Материалы диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах НИИЯФ МГУ и ежегодных международных конференциях «Ядро» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра в 2000, 2001, 2002, 2003, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.

Публикации

Соискатель имеет 170 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 48 работ (список приведен в заключительной части автореферата), опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности. Автором получены 2 свидетельства о праве собственности на программное обеспечение.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В мнимой части ДОП при отрицательных энергиях проявляется оболочечный эффект, приводящий к расширению энергетической частично-дырочной щели в магических ядрах.

2. Параметр диффузности хартри-фоковской составляющей нейтронного и протонного ДОП зависит от относительного нейтронного избытка и влияет на особенности эволюции одночастичных уровней.
3. Разработанная систематика глобальных параметров хартри-фоковской составляющей нейтронного и протонного ДОП позволяет описывать и предсказывать одночастичные характеристики стабильных близких к сферическим ядер с A от 40 до 208 в интервале энергии от -70 до $+70$ МэВ.
4. Разработанный метод конструирования ДОП позволяет предсказывать одночастичные характеристики нестабильных ядер вплоть до границ нуклонной стабильности.
5. При приближении к границе нейтронной стабильности увеличивается концентрация расчетных нейтронных уровней вблизи энергии Ферми и уменьшается энергетическая частично-дырочная щель, ослабляются традиционные ($N = 20, 28, 50$) и возникают нетрадиционные магические числа ($N = 16, 32, 34, 56$), происходит смена последовательности ряда уровней вблизи энергии Ферми.
6. При приближении к границе протонной стабильности магические свойства ядер с числами $Z = 28, 50, 82$ сохраняются, при N вблизи 32 возникает нетрадиционное слабое магическое число $Z = 32$, а при приближении к границе нейтронной стабильности возникает нетрадиционное магическое число $Z = 14$.

Структура и объем диссертации.

Общий объём диссертации составляет 256 страниц. Диссертация содержит 143 рисунка и 58 таблиц. Список цитируемой автором литературы состоит из 230 источников. Диссертационная работа состоит из введения,

четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и четырёх приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность, сформулирована цель и научная новизна диссертационной работы, аргументирован выбор модели для теоретического исследования, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена основам дисперсионного подхода к определению среднего поля ядер и его состоянию к началу исследований, вошедших в диссертацию. В ней даны предпосылки введения единого среднего поля для положительных и отрицательных одночастичных энергий, представлены одночастичные характеристики ядер, вычисляемые в дисперсионной оптической модели, и приведены разработанные ранее в литературе варианты реализации дисперсионной оптической модели: дисперсионный оптико-модельный анализ (ДОМА) и вариационное приближение моментов.

В середине прошлого века был достигнут большой прогресс в понимании свойств ядер в связи с развитием оболочечной (при $E < 0$) и оптической (при $E > 0$) моделей. Долгое время они развивались независимо. Реализовать на практике их единство оказалось возможным только в конце прошлого века в пионерских работах Махо, Сартора и соавторов [3]. Им удалось, собрав всю накопившуюся к тому времени информацию о мнимой части нуклонного оптического потенциала ядер и обоснованно распространив ее на весь энергетический интервал от $-\infty$ до $+\infty$, взять дисперсионный интеграл в выражении для действительной части ДОП:

$$V(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; E) = V(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + P/\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; E')}{E' - E} dE' . \quad (1)$$

В результате центральная действительная часть ДОП представляется в виде суммы двух слагаемых:

$$U_p(r, E) = V_{\text{HF}}(r, E) + \Delta V(r, E). \quad (2)$$

Если хартри-фоковская составляющая ДОП $V_{\text{HF}}(r, E)$ плавно зависит от энергии, то дисперсионная составляющая $\Delta V(r, E)$, вычисляемая аналитически из дисперсионного соотношения по данным о мнимой части $W_I(r, E)$, зависит от E резко вблизи E_F . Введение в потенциал дисперсионной составляющей $\Delta V(r, E)$ позволило объяснить особенности энергетических зависимостей действительной части потенциалов оболочечной и оптической моделей и объединить их, существенно уменьшив неоднозначности в определении параметров потенциалов. Новая модель получила название дисперсионной оптической модели.

На рис.1 в качестве иллюстрации представлена энергетическая зависимость объемного интеграла $J_R(E)$ от действительной части протонного ДОП ядра ^{208}Pb в диапазоне энергии от -80 до +60 МэВ.

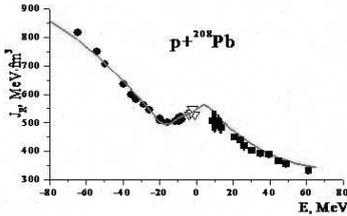


Рис. 1. Объемный интеграл $J_R(E)$ от действительной части протонного ДОП ядра ^{208}Pb . Значки – эмпирические значения, линия – расчет по ДОМ

Разработанная Махо и соавторами ДОМ позволяет вычислять как сечения рассеяния нуклонов ядром ($\sigma_{el}(\theta)$, σ_{tot} , σ_r) и поляризацию $(P(\theta))$, так и одночастичные характеристики ядра, а именно, одночастичные энергии E_{nlj} , вероятности заполнения одночастичных состояний N_{nlj} , фрагментационные ширины Γ_{nlj} , спектроскопические факторы S_{nlj} и спектральные функции ζ_{nlj} , а также распределение плотности ядра в одночастичном подходе. В первой главе представлены выражения для расчета этих характеристик для сферических и близких к ним ядер. Учет вклада дисперсионной составляющей привел к сужению частично-дырочной энергетической щели G и к улучшению согласия одночастич-

ных энергий с экспериментом. Вероятности заполнения одночастичных состояний, вычисленные по приближенным формулам ДОМ, согласуются с данными реакции ($e, e p$), свидетельствующими о наличии дальнедействующих и короткодействующих корреляций.

Авторы модели разработали ДОМ на примере магических и дважды магических ядер ^{40}Ca , ^{90}Zr и ^{208}Pb и получили хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными. Они развили два подхода к определению параметров ее сферической версии для стабильных ядер: дисперсионный оптико-модельный анализ и вариационное приближение моментов. В первом подходе большая часть параметров ДОП определяется при подгонке к экспериментальным данным по рассеянию нуклона ядром, которых, как правило, значительно больше, чем данных по одночастичным состояниям. Во втором подходе параметры определяются при подгонке к эмпирическим значениям радиальных моментов действительной части потенциала традиционной (недисперсионной) оптической модели. Оба подхода требуют наличия экспериментальных данных по рассеянию или найденных при их описании эмпирических значений радиальных моментов потенциала и приводят к близким значениям параметров ДОП.

После пионерских работ Махо и соавторов дальнейшей разработкой и применением ДОМ для систем нуклон + ядро занялись несколько научных групп в мире, включая научную группу НИИЯФ МГУ. Дисперсионный подход успешно применяется также при анализе данных по рассеянию α -частиц и легких ионов ядрами.

Перед тем, как решать задачу предсказания одночастичных свойств нестабильных ядер при изменении числа нуклонов вплоть до границ нуклонной и, в частности, нейтронной стабильности, было необходимо разработать метод конструирования ДОП, не требовательный к наличию экспериментальных данных по рассеянию нуклонов ядрами и проверить его надежность,

сравнивая результаты расчета с экспериментальными данными для стабильных ядер. До недавнего времени погрешности одночастичных энергий E_{nlj} вблизи энергии Ферми E_F , определяемых из реакций срыва или подхвата нуклона по отдельности, составляли 20-30%. Метод согласования данных, получаемых из реакций срыва и подхвата нуклона на одном и том же ядре (далее метод срыв + подхват), разработанный И.Н. Бобошиным и соавторами в НИИЯФ МГУ [4], позволил свести погрешности значений E_{nlj} вблизи E_F к 10% и тем самым открыл новые возможности для развития дисперсионного подхода к определению среднего поля ядер. В результате научной группой НИИЯФ МГУ был развит способ конструирования ДОП, который может быть применим к сферическим и близким к ним стабильным ядрам с $40 \leq A \leq 208$. Способ базируется на использовании предсказаний современных систематик [5, 6] глобальных параметров традиционной (недисперсионной) оптической модели и анализе наиболее точных и надежных данных об одночастичных энергиях вблизи энергии Ферми, полученных методом срыв + подхват. Результаты его применения к стабильным изотопам ядер от Ca до Sn представлены во второй главе.

Во второй главе дано описание метода конструирования ДОП для стабильных ядер, не требовательного к наличию экспериментальных данных по рассеянию. Показано хорошее согласие результатов расчета протонных одночастичных характеристик ядра ^{90}Zr , вычисленных с его использованием, с экспериментальными данными, а также с результатами расчета по методу ДОМА. В дальнейшем разработанный метод применен для вычисления нейтронных и протонных одночастичных характеристик стабильных изотопов ядер от Ca и Sn. В результате удалось описать экспериментальные особенности одночастичных характеристик стабильных ядер и выявить проявление оболочечного эффекта в мнимой части ДОП при отрицательных энергиях.

В конце прошлого – начале нынешнего века появились две систематики нуклонных глобальных параметров традиционной (недисперсионной) оптической модели для сферических и близких к ним ядрам: СН89 [5] и КД [6]. Систематика СН89 (1989 г.) определена для ядер с массовым числом A от 40 до 209 в диапазоне энергии налетающих нуклонов от 10 до 65 МэВ, а систематика КД (2003 г.) – для ядер с массовым числом A от 24 до 209 и энергии от 1 кэВ до 200 МэВ.

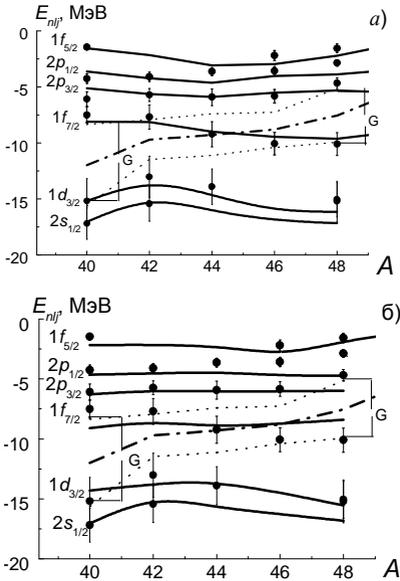


Рис. 2. Нейтронные одночастичные энергии ядер $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$. Точки – экспериментальные данные метода срыв+подхват. Сплошные линии – расчет с ДОП настоящей работы (а) и с глобальными параметрами КД (б), штрихпунктирная линия – энергия Ферми, пунктирные линии – $S_n^{AME}(N, Z = 20)$, $-S_n^{AME}(N+1, Z = 20)$.

Систематика КД (2003 г.) – для ядер с массовым числом A от 24 до 209 и энергии от 1 кэВ до 200 МэВ.

Систематика КД была разработана при анализе существенно более широкой, чем СН89, базы экспериментальных данных по сечениям упругого рассеяния и поляризации протонов и нейтронов, а также полным сечениям взаимодействия нейтронов. Кроме этого систематика КД в большей степени отражает теоретические достижения оптической модели, в частности, энергетическая зависимость ее мнимого потенциала определена в интервале от E_F до 200 МэВ, что позволяет использовать ее для вычисления дисперсионного интеграла.

Однако оказалось, что непосредственное использование энергетической зависимости $W_l(E)$ КД для вычисления дисперсионного интеграла без изменений не позволяет согласовать расчетные энергии E_{nlj} с экспериментальными дан-

ными в пределах погрешности последних. В частности, не удается описать наблюдаемую «чашеобразную» динамику нейтронного уровня $1f_{7/2}$ в изотопах Ca, Ti, Cr, Fe. Экспериментально было обнаружено, что при заполнении этого состояния $1f_{7/2}$ в изотопах Ca его энергия опускается вниз, а при дальнейшем увеличении числа N в изотопах Fe – поднимается вверх. На рис. 2б показаны нейтронные одночастичные энергии изотопов $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$, вычисленные с глобальными параметрами W_I^{KD} мнимой части ОП систематики KD. Такой расчет не позволил описать также расширение щели G в дважды магических ядрах $^{40,48}\text{Ca}$. Хорошего описания удалось добиться (см. рис. 2а), расширив для этих ядер интервал энергий вблизи E_F , где поверхностная составляющая W_d мнимой части ДОП, вносящая основной вклад в поглощение при этих энергиях, может быть приравнена к 0. Энергетическая зависимость объемного интеграла J_d от этой составляющей представлена рис. 3.

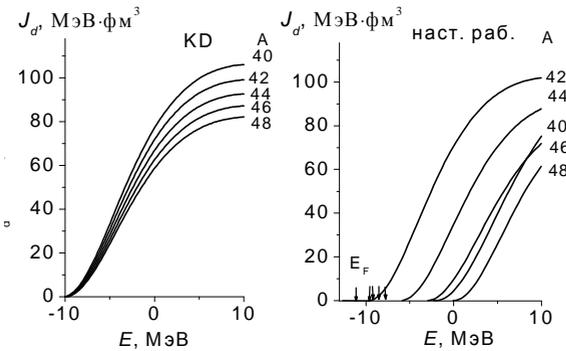


Рис. 3. Объемный интеграл $J_d(E)$ нейтронного ДОП изотопов $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$.

Этот рисунок демонстрирует, что вблизи энергии E_F интервал энергий, где поглощение близко к 0, значительно больше для магических ядер, чем для немагических. Меньшие значения поглощения для магических

ядер сохраняются и в области низких положительных энергий. Глобальная массовая зависимость поглощения, предсказываемая систематикой KD, восстанавливается при $E > 20$ МэВ. Опыт определения ДОП для исследованных стабильных изотопов ядер от Ca до Sn подтвердил проявление оболочечного эффекта в одночастичных характеристиках при отрицательных энергиях.

Ранее большое число как экспериментальных, так и теоретических исследований были посвящены изучению закономерностей проявлений оболочечного эффекта в сечениях $\sigma(\theta)$, σ_r и поляризации $P(\theta)$ при положительных энергиях. Таким образом, проведенные исследования позволили сформулировать метод конструирования ДОП для стабильных ядер.

Метод конструирования ДОП для расчета одночастичных характеристик стабильных ядер базируется на возможности определить параметры мнимой части W_l ДОП, используя предсказания систематик глобальных параметров ТОМ. Один из параметров энергетической зависимости W_l , ответственный за скорость нарастания поглощения, остается при этом свободным для того, чтобы учесть с его помощью оболочечный эффект. Его значение находится из условия наилучшего описания совокупности одночастичных энергий, полученных методом срыв + подхват, как и зависимость от энергии хартри-фоковской составляющей ДОП. Спин-орбитальный и кулоновский потенциалы заимствуются из систематик глобальных параметров. Значение энергии Ферми находится по оцененным данным об энергии отделения нуклона $S(A)$, $S(A+1)$ от ядра с массовым числом A и $A + 1$.

Применимость метода для расчета всей совокупности одночастичных характеристик и сечений рассеяния была проверена на системе $p + {}^{90}\text{Zr}$. Сравнение полученных результатов расчета дифференциальных сечений упругого рассеяния $\sigma(\theta)/\sigma_{Ruth}(\theta)$ протонов, поляризации $P(\theta)$, полных сечений реакций σ_r и одночастичных характеристик: одночастичных энергий E_{nlj} , эффективной массы протона в ядре $\langle m^*_{nlj}/m \rangle$, среднеквадратичных радиусов R_{nlj}^{rms} одночастичных состояний, спектроскопических факторов S_{nlj} и спектральных функций $\zeta_{nlj}(E)$, фрагментационной ширины Γ_{nlj} , вероятностей заполнения одночастичных орбит N_{nlj} с имеющимися экспериментальными данными и результатами расчета по ДОМА свидетельствуют о применимости

метода конструирования ДОП для стабильных ядер.

В этой главе продемонстрировано также, что кроме оболочечного эффекта важную роль при описании динамики и эволюции одночастичных характеристик играет зависимость параметра диффузности a_{HF} хартри-фоковской составляющей ДОП от относительного нейтронного избытка. Показано, что приравнивание этого параметра к параметру a_V систематики КД позволяет воспроизвести смену протонных уровней $2s_{1/2} - 1d_{3/2}$ в изотопах Са и $1g_{7/2} - 2d_{5/2}$ в изотопах Sn лишь качественно. Чтобы достичь количественного согласия с экспериментальными данными необходимо уменьшать параметр a_{HF} протонного ДОП с увеличением нейтронного избытка. Аналогично, параметр a_{HF} нейтронного ДОП с увеличением нейтронного избытка необходимо увеличивать для достижения количественного согласия с более быстрым заглублением нейтронного уровня $1f_{5/2}$ по сравнению с соседними уровнями $2p$ в изотопах Са, Ti, Cr, Fe, Ni при увеличении $A(Z)$. Для такой зависимости в диссертации предложено выражение:

$$a_{HF} = a_{HF}^0 + a_{HF}^1 \cdot A \pm a_{HF}^2 \frac{(N-Z)}{A}, \quad + \text{ для n, } - \text{ для p,} \quad (3)$$

параметры которого планируется определить в будущих исследованиях.

Таким образом, с помощью разработанного метода удалось описать в рамках ДОМ экспериментальные одночастичные характеристики стабильных изотопов исследованных ядер и особенности их одночастичных спектров, в частности: динамику нейтронного уровня $1f_{7/2}$, эволюцию нейтронного уровня $1f_{5/2}$ в ядрах от Са до Ni, инверсию протонных уровней $2s_{1/2} - 1d_{3/2}$ в изотопах Са и $1g_{7/2} - 2d_{5/2}$ в изотопах Sn, расширение частично-дырочной щели G в магических ядрах по сравнению с немагическими, параллельное заполнение нейтронных состояний вблизи E_F в ядрах Cr, Fe, Ni, Sr, формирование нейтронных псевдоспиновых дублетов $1g_{7/2}$, $2d_{5/2}$ и $2d_{3/2}$, $3s_{1/2}$ в изотопах Sn.

В третьей главе представлены 1) разработанная систематика глобальных параметров составляющей ДОП хартри-фоковского типа, которая вместе

мнимым потенциалом из имеющихся в литературе систематик составляет набор глобальных параметров для вычисления одночастичных характеристик сферических и близких к ним ядер с A от 24 до 208; 2) метод конструирования ДОП для нестабильных ядер вплоть до границы нейтронной стабильности.

Первые в мире глобальные параметры действительного потенциала среднего поля с учетом дисперсионной связи были определены автором настоящей диссертационной работы при анализе нейтронных и протонных одночастичных энергий ядер ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{208}Pb в работе 2003 года. В ней был предложен нуклонный оптический потенциал (в дальнейшем именуемый Б03), действительная часть которого для удобства последующего применения была представлена традиционной формой Вудса-Саксона с параметром радиуса, энергетическая зависимость которого отражала дисперсионное соотношение. Действительная часть потенциала Б03 имеет радиальную зависимость в виде функции Вудса-Саксона. Переход от действительной части, представляемой суммой хартри-фоковской и дисперсионной составляющих, к эффективному потенциалу с вудс-саксоновской формой осуществлен с целью удобства дальнейшего применения, т.к. различные приложения оптического потенциала традиционно предполагают вудс-саксоновскую форму действительной части. Силовой параметр действительной части зависит от энергии и от относительного нейтронного избытка в соответствии с выражением:

$$V_R = V_0 + 0.299E_C \pm V_t \frac{N-Z}{A} + V_e \exp[-aE] \quad (+ \text{ для } p, - \text{ для } n). \quad (4)$$

Для параметров V_0 , V_e и a были найдены значения $V_0 = 25.5$ МэВ, $V_e = 27.6$ МэВ и $a = 0.0105$ МэВ $^{-1}$ (E в МэВ). Кулоновская поправка $0.299 E_C$ (МэВ) взята из систематики СН89. Для параметра V_t было зафиксировано значение

24 МэВ. Параметр радиуса $r_V(E)$ действительной части потенциала Б03 представляется следующим выражением:

$$r_V(E) = r_V(E_F) + r_V^{(1)} \left\{ \frac{\beta_l(E - E_F)[(E - E_F)^2 + \beta_l^2]}{(E - E_F)^4 + \beta_l^4} - \frac{\beta_s(E - E_F)[(E - E_F)^2 + \beta_s^2]}{(E - E_F)^4 + \beta_s^4} \right\} - r_V^{(2)}(E - E_F)^2. \quad (5)$$

Разность в фигурных скобках зависит от энергии аналогично объемному интегралу от поверхностной дисперсионной составляющей ДОП. Последнее слагаемое в (5) позволяет лучше описать область энергии $|E - E_F| > 30$ МэВ.

Для параметров выражения (5) были найдены следующие значения:

$$r_V(E_F) = 1.21 \text{ фм}, r_V^{(1)} = 0.015 + 0.00047\alpha \text{ (фм)}, r_V^{(2)} = 3.76 \cdot 10^{-6} \text{ (фм/МэВ}^2\text{)}, \quad (6)$$

$$\beta_l = 12.5 \text{ МэВ}, \quad \beta_s = 60.0 \text{ МэВ}.$$

Параметры β_l и β_s являются одновременно и параметрами мнимой части ДОП.

Первый набор глобальных параметров нуклонного ДОП был представлен в работе 2004 года. Потенциал этой работы (в дальнейшем Б04) отличается от потенциала Б03 тем, что действительная часть представлена суммой хартри-фоковской и дисперсионной составляющих. Мнимая часть потенциалов Б03 и Б04 одинакова. Глобальные геометрические параметры вудсаксоновской формы Б04 фиксированы для всех систем $r_{\text{HF}} = 1.21$ фм и $a_{\text{HF}} = 0.69$ фм, а силовой параметр $V_{\text{HF}}(E)$ представляется выражением:

$$V_{\text{HF}}(E) = \left(V_0 \pm V_t \frac{N - Z}{A} + E_C V_C \right) \exp \left[-\eta E \left(V_0 \pm V_t \frac{N - Z}{A} + E_C V_C \right)^{-1} \right] \quad (+ \text{ для } p, - \text{ для } n) \quad (7)$$

с параметрами

$$V_0 = 51.44 \text{ МэВ}, V_t = 21 \text{ МэВ}, V_C = 0.27, \eta = \begin{cases} 0.439 - 0.000381A & (n) \\ 0.469 - 0.000153A & (p) \end{cases}.$$

Появление систематики КД позволило автору диссертационной работы разработать набор глобальных параметров ДОП с мнимым потенциалом, заимствованным из нее. Хартри-фоковская составляющая такого потенциала (в

дальнейшем потенциала Б07) была определена в работе 2006 года и впоследствии незначительно скорректирована в работе 2007 года при анализе экспериментальных данных по E_{nij} для нейтронных и протонных состояний ядер ^{40}Ca , ^{48}Ca , ^{52}Cr , ^{54}Fe , ^{56}Ni , ^{90}Zr , ^{208}Pb . Силовой параметр $V_{HF}(E)$ потенциала Б07 представляется формулой:

$$V_{HF}(E) = \left(V_0 \pm V_t \frac{N-Z}{A} + E_C V_C \right) \exp[-\kappa E] \quad (+\text{для } p, - \text{ для } n), \quad (8)$$

где $V_0=51.92$ МэВ, $V_t=12.5$ МэВ, $V_C=0.32$ для протонов и $V_0=51.04$ МэВ, $V_t=22$ МэВ для нейтронов. Кулоновская энергия для протонов E_C была взята из систематики СН89. Параметр κ зависит от относительного нейтронного избытка:

$$\begin{cases} \kappa = 0.00808 - 0.00427(N-Z)/A & \text{для } p \\ \kappa = 0.00773 + 0.00382(N-Z)/A & \text{для } n \end{cases} \quad (9)$$

Кроме этих параметров в Б07 найдены также массовые зависимости энергии Ферми $E_F(N,Z,A)$ для протонных и нейтронных состояний, определенные из выражения теории БКШ по экспериментальным данным о вероятностях заполнения связанных состояний нуклона, полученных методом срыв + подхват:

$$E_F^n = -12.46 + 35.36(N-Z)/A \text{ (МэВ)}, \quad E_F^p = -11.93 - 54.82(N-Z)/A + E_C \text{ (МэВ)}. \quad (10)$$

Параметры выражений (10) оказались близкими к определенным ранее Махо и соавторами.

Область применения потенциалов Б03-07 – сферические и близкие к ним ядра с массовым числом от 40 до 208 и энергия от –65 до +65 МэВ. На рис. 4 показано соответствие результатов предсказательных расчетов энергий $E_{nij}^{Б07}$ экспериментальным данным для ядер ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{208}Pb (экспериментальные погрешности около 10 – 15% вблизи энергии Ферми на рисунке не указаны). Расчет выполнен с глобальными параметрами мнимого потенциала КД

без учета оболочечного эффекта. Рисунок демонстрирует согласие расчетов со всей совокупностью энергий как состояний вблизи энергии Ферми, так и для глубоколежащих состояний. Для лучшего описания частично-дырочной щели необходимо учесть оболочечный эффект в мнимой части потенциала.

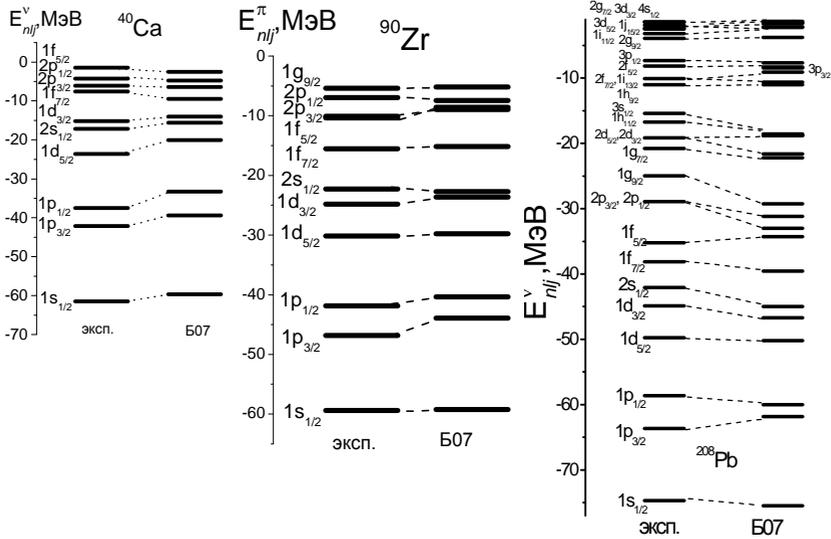


Рис. 4. Одночастичные энергии ядер ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{208}Pb

Для сравнительной характеристики предсказаний одночастичных энергий, вычисленных с потенциалами Б03 – Б07, а также по релятивистской модели среднего поля (РМСР) [7] для протонных и нейтронных состояний каждого ядра были вычислены отношения $\chi_{Б07}^2/\chi_{Б04}^2$, $\chi_{Б04}^2/\chi_{Б03}^2$ и $\chi_{Б07}^2/\chi_{РМСР}^2$ и их средние геометрические:

$$\langle \chi_{Б07}^2/\chi_{Б04}^2 \rangle_A = M \sqrt{\prod_1^M (\chi_{Б07}^2/\chi_{Б04}^2)}, \quad \langle \chi_{Б04}^2/\chi_{Б03}^2 \rangle_A = M \sqrt{\prod_1^M (\chi_{Б04}^2/\chi_{Б03}^2)},$$

$$\langle \chi_{Б07}^2/\chi_{РМСР}^2 \rangle_A = M \sqrt{\prod_1^M (\chi_{Б07}^2/\chi_{РМСР}^2)}, \quad (11)$$

где M – количество ядер, по которым ведется усреднение. Результаты представлены на рис. 5 (для протонных состояний) и на рис. 6 (для нейтронных состояний). На этих рисунках приведены средние геометрические (11), усредненные по ядрам в диапазоне массовых чисел A от 40 до 208, а также в интервале от 40 до 64 и от 84 (для протонов от 90) до 208. Рисунки демонстрируют, что лучшее описание энергий $E_{nlj}^{эксн.}$ достигается при использовании глобальных параметров потенциала Б07. Одна из причин этого – более точная мнимая часть потенциала Б07 по сравнению с мнимой частью потенциалов Б04 и Б03. Другая причина заключается в том, что при определении по-

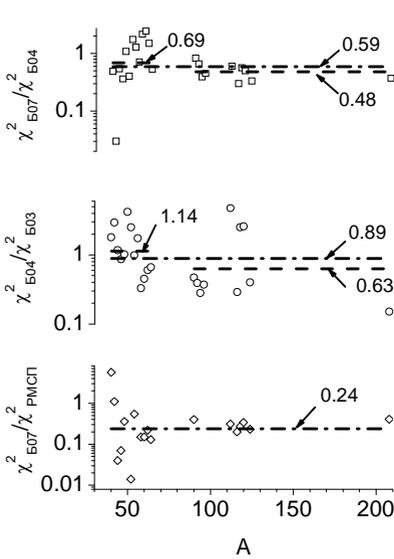


Рис. 5. Отношения среднеквадратичных отклонений $\chi_{Б07}^2/\chi_{Б04}^2$, $\chi_{Б04}^2/\chi_{Б03}^2$ и $\chi_{Б07}^2/\chi_{РМСП}^2$ для протонных состояний. Числа – значения средних (11)

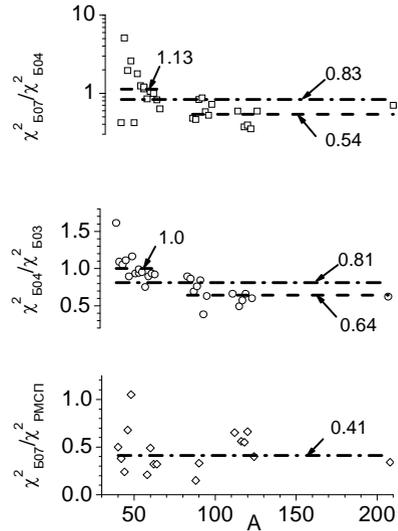


Рис. 6. То же, что и на рис. 5 для нейтронных состояний

тенциала B07 в анализ были включены данные по $E_{nlj}^{эксн}$ для большего количества ядер, чем при определении потенциалов B03,04. Также видно, что в среднем предсказания B07 лучше согласуются с экспериментальными данными, чем РМСР [7]. В Приложении 2 представлены нейтронные и протонные одночастичные энергии стабильных ядер от Ca до Sn, вычисленные с глобальными параметрами B03,04,07, в сравнении с экспериментальными данными.

Практически одновременно с работами, в которых были опубликованы глобальные параметры ДОП B03 – 07, вышли работы, в которых были представлены глобальные параметры ДОП MR [8] (MR04, MR06, MR07) для расчета одночастичных характеристик ядер и данных по рассеянию нуклонов с энергией < 200 МэВ. Отличительной особенностью потенциалов MR04 – 07 является представление хартри-фоковской составляющей ДОП экспоненциальным выражением, отражающим нелокальность Пери-Бака. На практике значения $V_{HF}(E)$ находятся методом итераций. Однако сходимость процесса итераций нарушается для энергий $E < -40 - -50$ МэВ, что не позволяет непосредственно использовать данный потенциал для расчета одночастичных характеристик глубоколежащих уровней. Вычисленное отношение величины χ_{B07}^2 к $\chi_{MR04,06}^2$ и χ_{MR07}^2 лежит в диапазоне от 0.12 до 0.53 для нейтронных и протонных состояний ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{208}Pb . При этом энергию нейтронного состояния $1s_{1/2}$ в ^{208}Pb вычислить не удалось из-за отсутствия сходимости процесса итераций. Наилучшее согласие с экспериментальными данными по одночастичным энергиям достигается с использованием разработанной автором диссертационной работы систематики B07, что позволяет использовать ее для расчетов одночастичных характеристик сферических и близких к ним ядер с A от 24 до 208.

Тем не менее надежность предсказания одночастичных характеристик ядер вблизи границы нейтронной стабильности при использовании глобаль-

ных параметров ДОП уменьшается из-за возрастания погрешности при экстраполяции параметров, найденных для области стабильных ядер. Для решения такой задачи был разработан метод конструирования ДОП, основанный на оценке вероятности заполнения одночастичных состояний и приводящий к описанию эмпирического значения энергии Ферми и согласию с числом нуклонов в ядре. В параграфе 3.3 продемонстрировано хорошее согласие вероятностей заполнения $N_{nlj}^{БКШ}$, вычисленных по формуле теории БКШ с энергиями $E_{nlj}^{ДОП}$, с экспериментальными значениями, полученными методом срыв + подхват.

Расчет с такими энергиями приводит к согласию суммарного числа нуклонов $N_{n(p)} = \sum_{nlj} (2j+1)N_{nlj}^{БКШ}(E_{nlj}^{ДОП})$ с числом N (Z) ядра. Условие достижения такого согласия предложено в качестве способа определения параметра $V_{HF}(E_F)$.

Таким образом, в третьей главе предложены 2 способа определения параметров ДОП. Мнимая часть в этих способах выбирается в соответствии с предсказаниями современных систематик глобальных параметров традиционной ОМ (с учетом оболочечного эффекта). Для определения хартрифоксовской составляющей предложены 1) наборы Б03 –07 ее глобальных параметров и 2) метод, основанный на соответствии суммарного числа нуклонов $N_{n(p)}$ числу N , Z ядра. Второй метод ориентирован на предсказательные расчеты одночастичных характеристик ядер вблизи границы нейтронной стабильности.

В **четвертой главе** выполнены расчеты нейтронных и протонных одночастичных энергий E_{nlj} и вероятностей заполнения N_{nlj} одночастичных состояний вблизи энергии Ферми изотопических цепочек ядер Si ($12 \leq N \leq 28$), Ca, Ti, Cr, Fe, Ni ($20 \leq N \leq 50$), Zn ($26 \leq N \leq 50$), Ge ($28 \leq N \leq 50$), Se ($30 \leq N \leq 50$), Sr ($46 \leq N \leq 56$), Zr ($N = 70$ и $78 \leq N \leq 88$), Ag ($48 \leq N \leq 82$), Cd ($50 \leq$

$N \leq 82$ и $N = 126$), Sn ($50 \leq N \leq 82$), Pb ($N = 92, 94$ и $118 \leq N \leq 188$) и их систематический анализ. Энергии E_{nlj} и вероятности заполнения N_{nlj} были вычислены с использованием разработанного метода конструирования ДОП для нестабильных ядер. На примере целого ряда ядер показано, что хартрифокковская составляющая, определенная этим методом, близка к предсказанию систематики Б07. Выполнено сравнение результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными и теоретическими предсказаниями, в частности в рамках оболочечной модели с учетом тензорного взаимодействия. Расчеты позволили проследить эволюцию нейтронных и протонных одночастичных состояний вблизи энергии Ферми и энергетической частично-дырочной щели при приближении к границе нейтронной стабильности и получить следующие результаты.

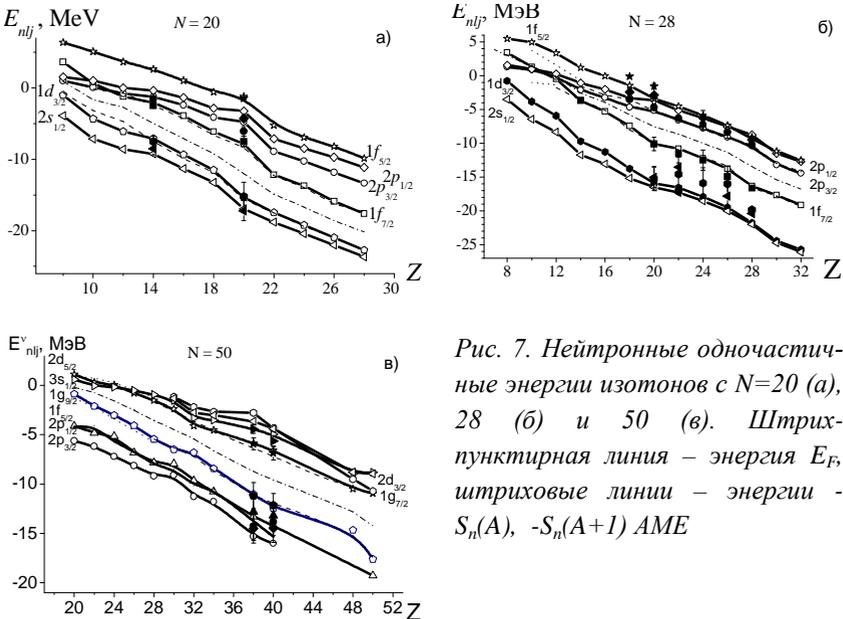


Рис. 7. Нейтронные одночастичные энергии изотонов с $N=20$ (а), 28 (б) и 50 (в). Штрихпунктирная линия – энергия E_F , штриховые линии – энергии $-S_n(A)$, $-S_n(A+1)$ AME

Прежде всего, обращает на себя внимание увеличение концентрации одночастичных уровней вблизи энергии Ферми в ядрах вблизи границы нейтронной стабильности (рис.7). Добавление нейтронов в области нейтронно-избыточных изотопов приводит к существенному уменьшению частично-дырочной щели G в ядрах с традиционными магическими числами нейтронов $N = 20, 28, 50$ вблизи границы нейтронной стабильности, что свидетельствует об ослаблении этих магических чисел.

Так, расчетная щель $N = 20$ сократилась с 7.5 МэВ в ^{40}Ca до 4.4 МэВ в ^{30}Ne , щель $N = 28$ – с 4.4 МэВ в ^{48}Ca до 1.5 МэВ в ^{42}Si , щель $N = 50$ – с 5.9 МэВ в ^{90}Zr до 1.5 МэВ в ^{70}Ca . Сокращение щели G облегчает переходы через нее и способствует развитию деформации ядер вблизи границы нейтронной стабильности. Предсказываемое сокращение щели G согласуется с уменьшением разности эмпирических значений энергий отделения нейтрона S_n от ядра с (N, Z) и $(N+1, Z)$ и с результатами расчетов в других теоретических подходах.

В нейтронно-избыточных ядрах традиционные магические числа могут не только ослабляться, но и исчезать, а на смену им возникать новые магические числа. Так, при приближении к границе нейтронной стабильности уменьшение щели $N = 20$ сопровождается ростом расчетной щели $N = 16$, достигнувшей расчетного значения ≈ 3 МэВ при $Z = 8$. Этот результат качественно согласуется с данными эксперимента, свидетельствующими, что изотоп ^{28}O несвязан, а наиболее тяжелым известным связанным изотопом кислорода является ^{24}O .

Еще одна особенность эволюции одночастичных энергий – смена последовательности уровней, которая может приводить к перестройке нейтронной конфигурации вблизи границы нейтронной стабильности. Один из ярких примеров – смена последовательности уровней $1f_{7/2}$ и $2p_{3/2}$ в изотопах с $N = 20$, которая происходит вслед за сокращением щели $N = 28$ (см. рис. 7). Такая

смена происходит в ядре ^{32}Mg , расположенном на краю острова инверсии. В результате, первым преимущественно свободным состоянием становится состояние $2p_{3/2}$ вместо состояния $1f_{7/2}$. Щель $N = 20$ формируется между состоянием $1d_{3/2}$ ниже E_F и состоянием $2p_{3/2}$ выше E_F . Эти состояния характеризуются одинаковым числом $j = 3/2$ и, будучи полностью занятыми, могут содержать 4 нейтрона. Значительное увеличение вклада возбуждений $4p4h$ в основное состояние ^{32}Mg было предсказано с помощью расчетов по модели оболочки [9, 10]. Согласно этим работам возбуждения $4p4h$ определяют положение этого ядра на берегу острова инверсии. Таким образом, можно предположить, что смена последовательности уровней $1f_{7/2}$ и $2p_{3/2}$, предсказываемая расчетами с ДОП, создает предпосылки для формирования острова инверсии.

Как упоминалось выше, оболочечный эффект учитывается мнимой частью ДОП, в частности ее поверхностной составляющей W_d . В настоящее время вопрос о зависимости W_d от нейтронного избытка остается открытым. В [11] были получены данные в пользу существенно более слабой зависимости W_d от $(N - Z)/A$ для нейтронов по сравнению с протонами для стабильных ядер с $Z < N$. Для выяснения влияния этой зависимости на одночастичные свойства ядер мы рассчитали энергии E_{nlj} и вероятности заполнения N_{nlj} для изотонов с $N = 20$ и $Z < 14$, предполагая, что W_d для нейтронов не зависит от $(N - Z) / A$. Результирующая щель $N = 20$ уменьшился сильнее, чем щель, полученная с глобальными параметрами КД. Кроме того, изменение порядка следования $1f_{7/2} - 2p_{3/2}$ происходит уже при $Z = 12$, в диапазоне отрицательных энергий. Таким образом, ослабление зависимости поверхностного поглощения нейтронов от нейтрон-протонной асимметрии приводит к более быстрому и выраженному гашению щели $N = 20$, а также к сдвигу Z , при котором происходит изменение порядка уровней $1f_{7/2} - 2p_{3/2}$, в сторону больших значений.

С изменением Z от 20 до 30 изменяется также последовательность уровней $\nu 1f_{5/2}$ и $\nu 2p_{1/2}$ в исследованных ядрах (рис. 8). Такая эволюция аналогична наблюдаемой в стабильных изотонах от Ca до Ni и рассмотренной в главе 2. Так, в изотонах с $N = 32, 34$ уровень $\nu 1f_{5/2}$ лежит выше $\nu 2p_{1/2}$ при $Z \leq 26$, и ниже – при $Z \geq 28$. При этом с увеличением Z энергия состояния $\nu 2p_{3/2}$ приближается к энергии E_F . Эволюция состояний $\nu 1f_{5/2}$ и $\nu 2p_{3/2}$ играет важную роль в исчезновении магичности чисел $N = 32, 34$. ДОП не включает в себя явно тензорную компоненту, однако он зависит от относительного нейтронного избытка. Такая зависимость предполагается, в частности, для параметра a_{HF} , значение которого растет с ростом $(N - Z)/A$. Результаты расчета с ДОП эволюции одночастичных спектров ядер с $N = 32, 34$ качественно согласуются с представлением о тензорных силах, действующих между нейтронами и протонами: при заполнении протонами оболочки $\pi 1f_{7/2} (j_>)$ в ядрах с Z от 20 до 28 тензорные силы притягивают нейтроны на подоболочке $\nu 1f_{5/2} (j_<)$ и отталкивают на подоболочке $\nu 2p_{3/2} (j_>)$.

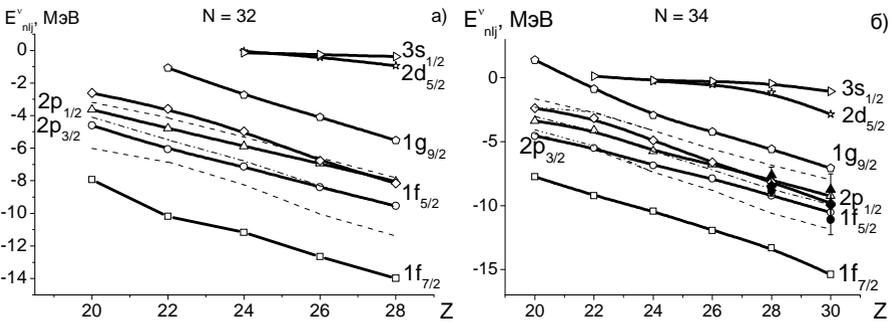


Рис. 8. Нейтронные одночастичные энергии ядер с $N=32$ (а), 34 (б). Светлые значки, соединенные сплошными линиями – расчет с ДОП, штрих-пунктирная линия – энергия E_F , штриховые – энергии $-S_n(A)$, $-S_n(A+1)$ АМЕ

Расчеты с ДОП поддерживают также представление о дважды магических свойствах ядер ^{60}Ca и ^{68}Ni с $N = 40$.

Смена последовательности нейтронных уровней $2d_{5/2} - 3s_{1/2}$ происходит в изотонах с $N = 50$, которая происходит вблизи $Z = 24 - 26$ аналогично смене уровней $1f_{5/2}$ и $\nu 2p_{1/2}$. В результате первым преимущественно свободным состоянием вблизи границы нейтронной стабильности становится состояние $3s_{1/2}$ с $l = 0$. Отсутствие центробежного барьера способствует росту радиуса R_{nl}^{rms} этого состояния в ^{70}Ca , который, таким образом, становится кандидатом в ядра с нейтронным гало. Аргументы в пользу нейтронной стабильности этого ядра приведены в работе [12], в которой доложено об экспериментальном наблюдении ядра ^{60}Ca .

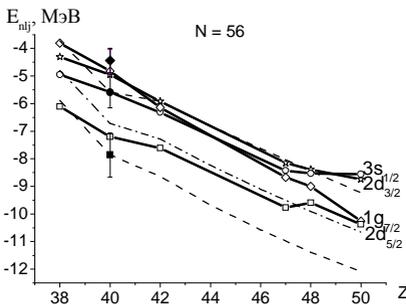


Рис. 9. Нейтронные одночастичные энергии изотонов с $N = 56$

спектры изотонов с $N = 56$ демонстрируют не только быстрое опускание состояния $\nu 1g_{7/2}$ (выше E_F) относительно E_F , но и подъем уровня $\nu 1d_{5/2}$ (ниже E_F при $Z < 48$). Такая эволюция определяет быстрое исчезновение магических свойств числа $N = 56$ при отклонении Z от 40 и качественно согласуется с представлением о действии тензорных сил, которые при заполнении протономы подоболочки $\pi 1g_{9/2}$ действуют притягивающее на нейтроны подоболочки $\nu 1g_{7/2}$ и отталкивающее – на $\nu 2d_{5/2}$. Расчеты показали также, что инверсия ней-

Также согласно расчетам с ДОП, с изменением Z изменяется последовательность нейтронных уровней $1g_{7/2} - 3s_{1/2}, 2d_{5/2}$ в изотонах с $N = 56$ (см. рис. 9). Это число в паре с $Z = 40$ представляет собой локальное магическое число, которое быстро исчезает при изменении Z [13]. С ростом Z от 40 до 50 расчетные нейтронные одночастичные

тронных уровней $1g_{7/2} - 3s_{1/2}, 2d_{5/2}$ становится более выраженной в предположении зависимости параметра диффузности a_{HF} с изменением избытка нейтронов в изотопах с $N = 56$.

Для обозначения новых свойств ядер, удаленных от границы β -стабильности, ранее были введены новые термины и среди них термин «слабое» магическое число. В диссертационной работе показано, что в расчетных одночастичных спектрах ядер со слабыми магическими числами признаки характерные для магических чисел проявляются частично. В частности, энергия Ферми располагается между E_- и E_+ , но сами эти энергии могут заметно отличаться от соответствующих энергий отделения, что говорит о влиянии корреляционных эффектов. Примером могут служить нейтронные одночастичные спектры изотонов с $N = 32$ (рис. 8а) при $Z < 24$. В диссертационной работе продемонстрированы предпосылки, которые создает сферический потенциал ДОМ для возникновения и исчезновения новых магических чисел $N = 16, 32, 34$ в нейтронно-перегруженных ядрах, а также $N = 56, 64$ в стабильных изотопах. ДОМ позволила не только предсказать эти новые магические числа, но и проследить их эволюцию, которая качественно согласуется с имеющимися экспериментальными данными. Таким образом, можно заключить, что ДОМ позволяет обрисовать достоверную картину эволюции одночастичных характеристик. Для объяснения причин возникновения и исчезновения новых магических чисел $N = 16, 32, 34, 56, 64$ важна эволюция нейтронных состояний $1d_{3/2}, 1f_{5/2}, 1g_{7/2}$ с квантовым числом $j_<$. С точки зрения тензорных сил эти состояния становятся более связанными при заполнении протонных состояний $1d_{5/2}, 1f_{7/2}, 1g_{9/2}$ с $j_>$ соответственно. Последние отделены от соседних протонных состояний достаточно большими энергетическими щелями, заполняются последовательно, и их действие на нейтронные состояния максимально при разности орбитальных моментов нейтронов и протонов $\Delta l = 0$. Тензорные силы могут приводить к большему расширению частично-дырочной щели в ядрах с новыми магическими числами. Несмотря на

то, что, как отмечалось выше, ДОМ не учитывает явно и в полной мере вклада тензорных сил, эволюция одночастичных характеристик согласуется с расчетами с их учетом. Она определяется, прежде всего, числом нуклонов A , создающих среднее поле, зависимостью потенциала от этого числа и относительного нейтронного избытка $\frac{(N-Z)}{A}$, спин-орбитальным взаимодействием, значением энергии Ферми E_F и др. Важную роль при описании эволюции одночастичных спектров ядер, удаленных от границы β -стабильности, играет зависимость параметра диффузности a_{HF} от нейтронного избытка. Здесь уместно напомнить, что в диссертации предложена зависимость (3), которая позволила, например, описать динамику нейтронного уровня $1d_{3/2}$ в нейтронно-избыточных изотопах Si, экспериментальные энергии которого были оценены в [14]. Параметры этой зависимости планируется в дальнейшем определить по имеющимся данным об одночастичных энергиях для ядер, удаленных от долины β -стабильности.

Из-за кулоновского взаимодействия граница протонной стабильности расположена при существенно меньших значениях относительного протонного избытка, чем нейтронная граница – при значениях нейтронного избытка. Поэтому новые свойства в протонно-перегруженных ядрах вблизи границы протонной стабильности выражены слабее, чем у нейтронно-перегруженных вблизи нейтронной границы. В настоящей работе приближение к границе протонной стабильности достигнуто в ядрах Ni, Zn, Ge, Sn, Pb. Расчеты поддерживают дважды магические свойства ядра ^{48}Ni , другими словами сохранение магического числа $Z = 28$ вблизи границы протонной стабильности. То же самое можно сказать и о традиционных магических числах $Z = 50$ (Sn) и 82 (Pb).

С изменением числа нейтронов эволюционирует и протонная структура ядер. На рис. 10а представлена эволюция протонных энергий изотопов Si, которая демонстрирует следующие особенности. Если в ^{26}Si энергия со-

стояния $2s_{1/2}$ близка к энергии E_F , то с увеличением N она отдаляется от нее и приближается к $-S_p(N+1, Z)$. Это приводит к уменьшению вероятности заполнения этого состояния и формированию магических признаков у числа $Z = 14$. Разрыв между N_{nlj} состояний $1d_{5/2}$ (последнего занятого) и $2s_{1/2}$ (первого незанятого) увеличивается с 0,32 в ^{26}Si до 0,60 в $^{34-42}\text{Si}$. Структура ядер в окрестности ^{42}Si была экспериментально исследована в реакциях выбивания нуклона из вторичных пучков экзотических ядер. В диссертации показано, что замыкание протонной подоболочки $Z = 14$ хорошо развито для таких ядер. Оно связано с отсутствием протонов на подоболочке $2s_{1/2}$, которое может приводить к истощению центральной протонной плотности ядра ^{34}Si с $N = 20$, т.н. «пузырьковой» структуре.

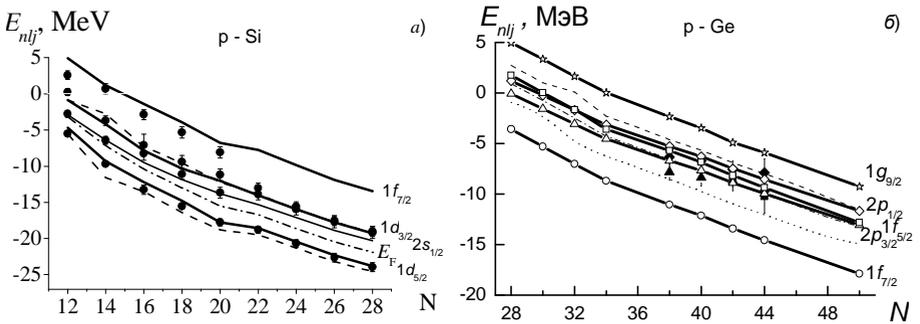


Рис.10. Протонные энергии E_{nlj} изотопов Si (а) и Ge (б)

Эволюция протонных спектров изотопов Ge с $Z = 32$ (рис. 10б) сходна с эволюцией нейтронных спектров изотонов с $N = 32$ (рис. 8а). В изотопах Ge в области N вблизи 32 энергия Ферми расположена между уровнями $2p_{3/2}$ и $2p_{1/2} - 1f_{5/2}$. Такая эволюция позволяет предположить возможную слабую магичность изотопов Ge вблизи $N = Z = 32$ аналогично магичности числа $N = 32$ в изотопах Ca. Это предсказание требует экспериментального подтверждения. В пользу увеличения магичности с уменьшением числа нейтронов в изотопах Ge говорят экспериментальные данные об энергии возбуждения

$E^*(2_1^+)$, которые примерно в полтора раза выше для изотопов Ge с $32 \leq N \leq 38$ (900-1000 кэВ), чем для изотопов с $42 \leq N \leq 48$ (≈ 600 кэВ), а также данные об энергии отделения протона, которые демонстрируют резкий рост разности $\Delta S_p = S_p(N, Z = 33) - S_p(N, Z = 32)$ до 5.15 МэВ при $N = 32$ по сравнению с 3.03 и 3.95 МэВ при $N = 30$ и 34 соответственно.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы, соответствующие положениям, выносимым на защиту.

В **Приложении 1** даны сводные таблицы параметров нейтронного и протонного ДОП.

В **Приложении 2** приведены таблицы с нейтронными и протонными одночастичными энергиями ядер, вычисленными с глобальными параметрами потенциалов B03,04,07 в сравнении с экспериментальными данными для стабильных исследованных ядер.

В **Приложении 3** представлены значения одночастичных энергий нестабильных ядер, оцененные методом зеркальных ядер.

В **Приложении 4** даны табличные значения нейтронных и протонных одночастичных энергий исследованных ядер, вычисленные по ДОМ.

Список цитируемой литературы

1. Perey F.G. SPI-GENOA: An Optical Model Code. Unpublished. 1975. Модификации: B.S. Nilsson (1976), Гончаров С.А., Тимофеюк Н.К. (1985), Гончаров С.А., Беспалова О.В. (1995).
2. Kunz P.D., Rost E. The Distorted-Wave Born Approximation. // Computational Nuclear Physics / Langanke K., Maruhn J.A., Koonin S.E. (eds). – 1993. V. 2. Springer. New York. NY. Модификация: Гончаров С.А., Беспалова О.В. (1998).
3. Mahaux C., Sartor R // Advances in Nuclear Physics. – 1991. –V.20. – P.1-224.

4. Boboshin I.N., Varlamov V. V., Ishkhanov B. S., Kapitonov I. M. // Nucl. Phys. – 1989. – V. A 496. – P. 93.
5. Varner R.L., Thompson W.J., Mc Abee T.L. *et al.* // Phys. Rep. –1991. – V.201. – P.57.
6. Koning A.J., Delaroche J.P. // Nucl. Phys. A. – 2003. –V. 713. – P. 231-310.
7. Typel S., Wolter H. H. // Nucl. Phys. A. – 1999. – V. 656. – P. 331.
8. Morillon B., Romain P. //Phys. Rev. – 2004. – V. C 70. – P. 014601, *ibid.* – 2006. – V. C 74. – P. 014601, *ibid.* – V. C76. – P. 044601.
9. A.O. Macchiavelli *et al.* // Phys. Rev. – 2016. – – V. C 94: – P. 051303
10. N. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu *et al.* // Phys. Rev. – 2017. – V. C. 95. –P. 021304(R).
11. R. J. Charity, J. M. Mueller, L. G. Sobotka, and W. H. Dickhoff // Phys. Rev. – 2007. – V. C 76. –P. 044314.
12. O. B. Tarasov, D. S. Ahn, D. Bazin *et al.* // Phys. Rev. Lett. – 2018. – V. 121. – P. 022501.
13. Boboshin I.N., Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Romanovsky E.A. // Physics of Atomic Nuclei. – 2007. – V. 70. –P. 1363.
14. Bespalova O. V., Fedorov N. A., Klimochkina A. A. *et al.* //Eur. Phys. J. A. – 2018. – V. 54. – P. 2.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и SCOPUS:

- A1. Беспалова О.В., Климошкина А.А., Спасская Т.И. Зарядовые радиусы и распределение протонной плотности изотопов Sn в дисперсионной оптической модели. // Ядерная физика. – 2020. – Т. 83. – №1. – С. 10. (IF 0.458).

- A2. O.V. Bespalova, A.A. Klimochkina. Single-particle structure of the $N = 20$, 28 isotones within the dispersive optical model // *Eur. Phys. J.* – 2019. – V. A 55: – P. 212. (IF 2018: 2.481).
- A3. Bespalova O.V., Fedorov N.A., Klimochkina A.A., Markova M.L., Spasskaya T.I., Tretyakova T.Yu. Evolution of single-particle structure of silicon isotopes // *Eur. Phys. J.* – 2018. – V. A 54. – P. 2. (IF: 2018 2.481).
- A4. Bespalova O.V., Romanovsky E.A., Spasskaya T.I. Nucleon-nucleus real potential of Woods-Saxon shape between -60 and $+60$ MeV for the nuclei // *Journal of Physics.* – 2003. – V. G 29. – N 6. – P.1193. (IF 2018: 3.534).
- A5. Беспалова О.В. Эволюция нейтронной одночастичной структуры нейтронно-избыточных изотонов с $N = 28$ в дисперсионной оптической модели // *Вестник Моск. ун-та. Сер. физ.– астроном.* – 2018. –Т. 73. – № 6. – С. 615. (IF 2018: 0.58).
- A6. Беспалова О.В., Климошкина А.А. Расчет плотностей изотопов Ca, Ni, Mo в дисперсионной оптической модели // *Ядерная физика.* – 2017. – Т 80. – № 5. – С. 516. (IF 0.458)
- A7. Беспалова О.В., Ермакова Т.А., Климошкина А.А., Спасская Т.И. Одночастичные характеристики изотопов Si с N от 12 до 20 в дисперсионной оптической модели // *Ядерная физика.* – 2017. – Т. 80. – № 5. – С. 509. (IF 0.458).
- A8. Беспалова О.В., Климошкина А.А., Коротков А.В., Спасская Т.И. Расчет одночастичных характеристик изотопов Pb в пределах, близких к границам нуклонной стабильности, в дисперсионной оптической модели // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. физ. астроном.* – 2017. – Т. 72. – № 1. – С. 48. (CiteScore 2018: 0.76).
- A9. Беспалова О.В., Ермакова Т.А., Климошкина А.А., Спасская Т.И. Нейтронные одночастичные характеристики изотопов серебра в дисперсионной оптической модели // *Известия РАН. Сер. физ.* – 2017. – Т. 81. – № 6. – С. 769. (CiteScore 2018: 0.36).

- A10. Беспалова О.В., Ермакова Т.А., Климочкина А.А., Спасская Т.И. Эволюция нейтронной подоболочки $N = 40$ в ядрах с $20 \leq Z \leq 30$ в дисперсионной оптической модели. // Ядерная физика. – 2016. – Т. 79. – № 4. – С. 380. (IF 0.458).
- A11. Беспалова О.В., Климочкина А.А., Спасская Т.И. Нейтронная одночастичная структура изотопов Мо в дисперсионной оптической модели. // Ядерная физика. – 2016. – Т. 79. – № 4. – С. 385. (IF 0.458).
- A12. О. В. Беспалова, Е. А. Романовский, Т. И. Спасская. Дисперсионный оптический потенциал ядер при изменении N, Z в направлении границ нуклонной стабильности. // Ядерная физика. – 2015. – Т. 78. – №1-2. – С. 123. (IF 0.458).
- A13. Беспалова О.В., Романовский Е.А., Спасская Т.И., Климочкина А.А. Протонный дисперсионный оптический потенциал для четно-четных изотопов Sn с $100 < A < 132$. // Ядерная физика. – 2015. Т. 78. – № 10. – С. 935. (IF 0.458).
- A14. Беспалова О.В., Ермакова Т.А., Климочкина А.А., Романовский Е.А., Спасская Т.И. Особенности одночастичных протонных спектров изотопов Ni, Zn и Ge вблизи границы протонной стабильности ядер. // Ядерная физика. – 2015. – Т. 78. – № 10. – С. 928. (IF 0.458).
- A15. О. В. Беспалова, Е. А. Романовский, Т.И. Спасская, А. А. Климочкина, Т. А. Ермакова. Исследование эволюции протонной оболочечной структуры изотопов Zr в рамках дисперсионной оптической модели. // Изв. РАН. Сер. физ. – 2015. М Т. 79. – № 4. – С. 587. (CiteScore 2018: 0.36).
- A16. О. В. Беспалова, Т. А. Ермакова, А. А. Климочкина, Е. А. Романовский, Т. И. Спасская. Анализ протонных одночастичных характеристик изотопов Zn и Ge // Ядерная физика. – 2014. Т. 77. – №12. – С. 1615. (IF 0.458).
- A17. О.В. Беспалова, Б.С. Ишханов, А.А.Климочкина, А.А. Костюков, Е.А.Романовский, Т.И. Спасская. Нейтронные одночастичные характе-

- ристики изотопов Cd с N от 50 до 82. // Известия РАН. Сер. физ. – 2014. Т. 78. – № 5. – С. 586. (CiteScore 2018: 0.36).
- A18. Беспалова О.В., Ермакова Т.А., Климочкина А.А., Романовский Е.А., Спасская Т.И. Оценка вероятностей заполнения одночастичных орбит в ядрах. // Известия РАН. Сер. физ. – 2013. Т. 77. – № 4. – С. 443. (CiteScore 2018: 0.36).
- A19. О.В. Беспалова, Т.А. Ермакова, А.А. Климочкина, Е.А. Романовский, Т.И. Спасская. Эволюция протонных оболочек ядер с $20 \leq Z \leq 28$ и $20 \leq N \leq 50$ и дисперсионная оптическая модель // Ядерная физика. – 2013. – Т. 76. – № 12. – С. 1566. (IF 0.458).
- A20. Беспалова О.В., Ермакова Т.А., Климочкина А.А., Романовский Е.А., Спасская Т.И. Дисперсионный оптический потенциал из анализа нейтронных одночастичных энергий изотопов Ti, Cr, Fe с числом нейтронов N от 20 до 50. // Ядерная физика. – 2012.– Т. 75.– № 11.– С.1425. (IF 0.458).
- A21. О. В. Беспалова, Е. А. Романовский, Т. И. Спасская. Расчет нейтронных одночастичных энергий изотопов Zr вблизи $N = 50, 70, 82$ // Известия РАН. Сер. физ. 2012.– Т. 76.– № 4.– С.560. (CiteScore 2018: 0.36).
- A22. О. В. Беспалова, Т. А. Ермакова, А. А. Климочкина, Е. А. Романовский, Т. И. Спасская. Анализ нейтронных одночастичных энергий изотопов Zn, Ge, Se в рамках модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом // Известия РАН. Сер. физ. – 2012. – Т. 76. – № 8. – С.942. (CiteScore 2018: 0.36).
- A23. О. В. Беспалова, Т. А. Ермакова, А. А. Климочкина, Х. Коура, Е. А. Романовский, Т. И. Спасская. Оценка и анализ нейтронных одночастичных энергий в ядре ^{78}Ni // Известия РАН. Сер. физ. – 2011, – Т.75.– № 4.– С.621. (CiteScore 2018: 0.36).
- A24. О.В. Беспалова, И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Т.А. Ермакова, Б.С. Ишханов, А.А. Климочкина, С.Ю. Комаров, Х. Коура, Е.А. Романовский,

- Т.И. Спасская. Оболочечная структура четно-четных изотопов Ni с числом нейтронов от 20 до 40 // Ядерная физика. – 2011. –Т.74.– № 11.– С.1555. (IF 0.458).
- A25. О. В. Беспалова, Т. А. Ермакова, А. А. Климочкина, Е. А. Романовский, Т. И. Спасская. Анализ одночастичных энергий протонных состояний $1f$ и $2p$ в изотопах $^{64,66,68}\text{Zn}$ в рамках модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом // Известия РАН. Сер. физ. – 2011. – Т. 75.– № 7.– С. 938. (CiteScore 2018: 0.36).
- A26. О.В. Беспалова, И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Т.А. Ермакова, Б.С. Ишханов, А.А. Климочкина, С.Ю. Комаров, Х. Коура, Е.А. Романовский, Т.И. Спасская. Нейтронная оболочечная структура ядер $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ и ее исследование в рамках модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом // Известия РАН. Сер. физ. – 2010. –Т. 74.– № 4.– С. 575. (CiteScore 2018: 0.36).
- A27. О.В. Беспалова, И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Т.А. Ермакова, Б.С. Ишханов, С.Ю. Комаров, Е.А. Романовский, Т.И. Спасская. Анализ одночастичных энергий нейтронных состояний в изотопах $^{64,66,68,70}\text{Zn}$ в рамках модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом // Известия РАН. Сер. физ. – 2010. – Т. 74.– № 6.– С. 892. (CiteScore 2018: 0.36).
- A28. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Т.А. Ермакова, Б.С. Ишханов, Е.А. Романовский, Т.И. Спасская, Т.П. Тимохина. Исследование оболочечной структуры магических и околомagicеских ядер с $40 \leq A \leq 132$ в рамках модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом // Ядерная физика. – 2009. –Т.72.– № 10. – С. 1686. (IF 0.458).
- A29. О.В. Беспалова, И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Т.А. Ермакова, Б.С. Ишханов, С.Ю. Комаров, Х. Коура, Е.А. Романовский, Т.И. Спасская. Энергии одночастичных протонных состояний $1p$ и $2f$ в изотопах $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ //

- Известия РАН. Сер. физ.– 2009. –Т.73.– № 6. – С. 867. (CiteScore 2018: 0.36).
- A30. О.В. Беспалова, И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, Е.А. Романовский, Т.И. Спасская. Расчет одночастичных энергий в ядре ${}_{38}^{96}\text{Sr}$ в рамках модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом // Известия РАН. Сер. физ. – 2009. – Т.73.– № 11.– С. 1537. (CiteScore 2018: 0.36).
- A31. О.В. Беспалова, Т.А. Ермакова, Е.А. Романовский, Т.И. Спасская, А.А. Климочкина. Расчет одночастичных энергий в ядрах ${}_{28}^{56}\text{Ni}_{28}$ и ${}_{28}^{78}\text{Ni}_{50}$ в рамках модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом // Известия РАН. Сер.Физ. – 2009. –Т.73.– № 6. – С. 863. (CiteScore 2018: 0.36).
- A32. О. В. Беспалова, И. Н. Бобошин, В. В. Варламов, Т. А. Ермакова, Б. С. Ишханов, Е. А. Романовский, Т. И. Спасская, Т. П. Тимохина. Одночастичные уровни ядер вблизи дважды магических ${}^{48}\text{Ca}_{28}$ и ${}^{56}\text{Ni}_{28}$ // Ядерная физика. – 2008.– Т. 71.– № 1.– С. 37. (IF 0.458).
- A33. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В. и др. Расчет одночастичных энергий связанных состояний нуклонов в ядрах с $40 \leq A \leq 208$ с глобальными параметрами дисперсионного оптического потенциала. Изв. РАН. Сер. физ. – 2007. Т. 71. – № 3. – С. 438. (CiteScore 2018: 0.36).
- A34. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Т.А.Ермакова, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спасская, Т.П.Тимохина. Нейтронная одночастичная структура ядер ${}^{48}\text{Ca}$, ${}^{50}\text{Ti}$, ${}^{52}\text{Cr}$, ${}^{54}\text{Fe}$, ${}^{56}\text{Ni}$ // Известия РАН. Сер. физ. – 2007. –Т. 71.– № 3.– С. 443. (CiteScore 2018: 0.36).
- A35. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Т.А.Ермакова, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спасская, Т.П.Тимохина. К вопросу о дважды магичности ядра ${}^{68}_{28}\text{Ni}_{40}$ // Известия РАН. Сер. физ.– 2007. – Т. 71.– № 3.– С. 451. (CiteScore 2018: 0.36).

- A36. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Т.А.Ермакова, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская, Т.П.Тимохина. Анализ одночастичных энергий в дважды магических ядрах $^{100,132}\text{Sn}$ в рамках дисперсионной оптической модели // Известия РАН. Сер. физ. – 2007. – Т. 71. – № 3. – С. 448. (CiteScore 2018: 0.36).
- A37. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В. и др. Глобальные параметры хартри-фоковской составляющей нуклонного дисперсионного оптического потенциала для ядер с $40 < A < 208$ в области $-65 < E < 65$ МэВ // Известия РАН. Сер. физ. – 2006. – Т. 70. – № 5. – С. 680. (CiteScore 2018: 0.36).
- A38. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В. и др. Нейтронные подболочки четно-четных ядер изотопов хрома // Известия РАН. Сер. физ. – 2005. – Т. 69. – № 11. – С.1687. (CiteScore 2018: 0.36).
- A39. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В. и др. Нейтронные подболочки четно-четных ядер Fe // Известия РАН. Сер. физ. – 2005. – Т. 69. – № 1. – С. 127. (CiteScore 2018: 0.36).
- A40. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Т.А.Ермакова, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская. Особенности нейтронной одночастичной структуры ядра $^{96}_{40}\text{Zr}_{56}$ // Известия РАН. Сер. физ. – 2005. – Т. 69. – № 1. – С. 123. (CiteScore 2018: 0.36).
- A41. Беспалова О.В., Романовский Е.А., Спаская Т.И. Дисперсионный оптический потенциал для расчета свойств связанных состояний нуклонов в ядрах с $40 \leq A \leq 208$ // Известия РАН. Сер. физ. – 2004. – Т. 68. – № 8. – С. 1214. (CiteScore 2018: 0.36).
- A42. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Ермакова Т.А., Ишханов Б.С., Романовский Е.А., Спаская Т.И., Тимохина Т.П., О предполагаемой магичности числа $N = 34$ в ядре $^{54}_{20}\text{Ca}_{34}$ // Известия РАН. Сер. физ. – 2004. – Т. 68, – № 8. – С. 1165. (CiteScore 2018: 0.36).

- A43. О.В. Беспалова, И.Н. Бобошин, В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Е.А. Романовский, Т.И.Спаская. Протонная и нейтронная плотности ядра ^{90}Zr в модели среднего поля дисперсионного оптико-модельного анализа // Известия РАН. Сер. физ. – 2001. – Т. 65.– № 11. – С.1553. (CiteScore 2018: 0.36).
- A44. Е.А.Романовский, О.В.Беспалова, С.А.Гончаров, Д.В.Плешков, Т.И.Спаская. Среднее поле для $p+^{90}\text{Zr}$ в области энергии $-60 < E < +65$ МэВ и одночастичные характеристики протонных состояний в ^{90}Zr из дисперсионного оптико-модельного анализа // Ядерная физика. – 2000. –Т. 63.– № 3. – С. 468. (IF 0.458).
- A45. Е.А.Романовский, О.В.Беспалова, Д.В.Плешков, Т.И.Спаская, Т.П.Кучнина. Метод определения средних параметров дисперсионного оптического потенциала для $p+A$ в области $40 < A < 208$ и $-60 < E < +65$ МэВ // Известия РАН. Сер. физ. – 2000. – Т. 64.– № 3. – С. 601. (CiteScore 2018: 0.36).
- A46. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В. и др. Среднее поле для $p+^{58,60,62,64}\text{Ni}$ в области энергий $-60 < E < +60$ МэВ и одночастичные характеристики протонных состояний в $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ из дисперсионного оптико-модельного анализа. Изв. АН. Сер. физ. – 2002. – Т. 66. – № 10. – С.1483. (CiteScore 2018: 0.36).
- A47. Е.А.Романовский, О.В.Беспалова, Д.В.Плешков, Т.И.Спаская, Т.П.Кучнина. Протон- $^{90,92,94,96}\text{Zr}$ среднее поле между -60 и $+65$ МэВ из дисперсионного оптико-модельного анализа // Известия РАН. Сер. физ. – 2000. – Т. 64.– № 1. – С. 161. (CiteScore 2018: 0.36).
- A48. Е.А.Романовский, О.В.Беспалова, Д.В.Плешков, Т.И.Спаская. Среднее протонное поле для системы $p+^{116,118,120,122,124}\text{Sn}$ в области энергий $-60 < E < +65$ МэВ из дисперсионного оптико-модельного анализа // Известия АН. Сер. физ. – 2000. – Т. 64.– № 3. – С. 596. (CiteScore 2018: 0.36).

Свидетельства о праве собственности на программное обеспечение:

- Б1. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Программа для ЭВМ «Disp» / О.В. Беспалова; правообладатель ФГБОУВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» — № 2019616517; заявл. 08.05.2019; зарегистр. 23.05.2019; опубл. 23.05.2019, бюлл. № 6.
- Б2. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Программа для ЭВМ «GLOB» / О.В. Беспалова; правообладатель ФГБОУВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» — № 2017662532; заявл. 12.09.2017; зарегистр. 10.11.2017.