

УДК 539.17.01

МАЛОНУКЛОННЫЕ ПЕРЕДАЧИ И СЛАБОДИССИПАТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В GRAZING-МОДЕЛИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

© 2013 г. В. В. Самарин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

E-mail: samarin@jinr.ru

Для представительного набора низкоэнергетических ядерных реакций рассмотрено применение квазиклассической модели А. Винтера (A. Winther), реализованной в программе GRAZING. Показано, что модель хорошо описывает процессы малонуклонных передач с малой диссипацией энергии для сферических ядер ^{40}Ca , ^{96}Zr , ^{208}Pb и ряда других. Удовлетворительное согласие с экспериментальными данными имеет место для передач не более одного протона и примерно 6–8 нейтронов. Указаны реакции, по которым согласие с экспериментальными данными не достигается при стандартном наборе параметров.

DOI: 10.7868/S0367676513070193

ВВЕДЕНИЕ

Касательные неупругие столкновения атомных ядер сопровождаются передачей нуклонов и деформацией поверхностей ядер — возбуждением коллективных степеней свободы. При этом относительное движение тяжелых ядер можно рассматривать на основе классической механики с использованием понятий классических траекторий и углов рассеяния, зависящих от прицельных параметров столкновения. Для внутренних степеней свободы — одночастичных состояний, низколежащих колебаний поверхностей ядер (квадрупольных, октупольных и т.д.) и высоколежащих колебаний (гигантских резонансов) — должно применяться квантовое описание. Характерным параметром при этом может служить минимальное расстояние s_{min} между поверхностями ядер (даже в приближении их неизменной сферической формы). Малым значениям s_{min} , касанию и пересечению ядерных поверхностей отвечают глубоко неупругие реакции и значительные передачи нуклонов. При достаточно больших s_{min} вероятности передач нуклонов и коллективных возбуждений малы, что позволяет использовать приближенные подходы (теорию возмущений, линейные части разложений в ряды, эмпирические модели и т.п.). Условиям больших и промежуточных значений расстояния s_{min} отвечает разработанная А. Винтером (A. Winther) [1, 2] квазиклассическая модель процессов малонуклонных передач с малой диссипацией энергии, реализованная в программе GRAZING [3]. В основе универсальных расчетных формул этой модели лежат следующие физи-

ческие предположения: одночастичные передачи и неупругое рассеяние с рождением элементарных возбуждений независимы; коллективными элементарными возбуждениями ядер являются фононы, возмущения для них линейны по параметрам деформации; вероятности независимых одночастичных переходов малы по сравнению с единицей (что типично для одночастичных переходов); ядра в основных состояниях (до столкновения) считаются сферическими. Модель использует табличные данные по энергиям связи ядер (дефектам массы), энергиям квадрупольных и октупольных возбуждений и вероятностям электромагнитных переходов из состояний с возбуждением одного вибрационного кванта ($B(E2)$, $B(E3)$). Остальные параметры: характеристики гигантских резонансов, плотности нейтронных и протонных состояний, формфакторы нуклонных передач и т.д. — находятся по универсальным эмпирическим или модельным формулам. Для каждой классической траектории (слабо зависящей от диссипации и флуктуаций энергии) модель включает в себя приближенное вычисление вблизи точки минимального сближения ядер r_0 вероятностей нуклонных передач, возбуждения низколежащих и высоколежащих колебаний и процедуру усреднения вероятностей этих процессов по прицельным параметрам b столкновения ядер (или моментам относительного движения l). Практическая независимость нейтронных и протонных передач друг от друга и от неупругих процессов в данной модели дает удобную возможность сравнения результатов расчета массовых и

зарядовых распределений с соответствующими экспериментальными данными. Подобный анализ неупругих процессов более сложен из-за наложения диссипации энергии, обусловленной различными коллективными возбуждениями и передачами нуклонов. Расчеты угловых распределений чувствительны к диссипации и флуктуациям энергии, а также к возможным отклонениям формы ядер от сферической. Программа GRAZING достаточно широко применяется для анализа экспериментальных данных (см., например, [4]). Удобную возможность выполнения расчетов массовых и зарядовых распределений с представлением результатов в наглядной графической форме дает запуск программы GRAZING на Интернет-сервере NRV [5].

В данной работе показано, что расчеты с помощью программы GRAZING хорошо описывают процессы малонуклонных передач с малой диссипацией энергии для сферических ядер ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{208}Pb и ряда других. Удовлетворительное согласие с экспериментальными данными имеет место для передач примерно 6–8 нейтронов (не более) и одного протона. Выявлены также реакции, по которым согласие с экспериментальными данными отсутствует при стандартном наборе параметров.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Допущение о независимой передаче нуклонов для столкновения с определенным прицельным параметром (определенным моментом относительного движения ядер) приводит к распределению Бесселя по числам передач нейтронов ΔN и протонов ΔZ

$$P(\Delta N, \Delta Z) = P(\Delta N)P(\Delta Z), \quad (1)$$

где

$$P(\Delta N) = \left(\frac{q^{\nu P}}{q^{\nu S}} \right)^2 \times \times I_{|\Delta N|} \left(2\sqrt{q^{\nu P} q^{\nu S}} \right) \exp(-q^{\nu P} - q^{\nu S}), \quad (2)$$

$$P(\Delta Z) = \left(\frac{q^{\pi P}}{q^{\pi S}} \right)^2 I_{|\Delta Z|} \left(2\sqrt{q^{\pi P} q^{\pi S}} \right) \exp(-q^{\pi P} - q^{\pi S}), \quad (3)$$

$q^{\nu P}, q^{\pi P}$ – средние числа подхваченных (pick-up) нейтронов (ν) и протонов (π), $q^{\nu S}, q^{\pi S}$ – средние числа сорванных (stripping) нейтронов и протонов. При стандартном наборе параметров программы GRAZING средние числа подхваченных и/или сорванных нуклонов оказываются порядка единицы. График распределения для такого случая представлен на рис. 1. Шестикратному превышению средних чисел передач нуклонов соответствует уменьшение вероятности на 3 порядка.

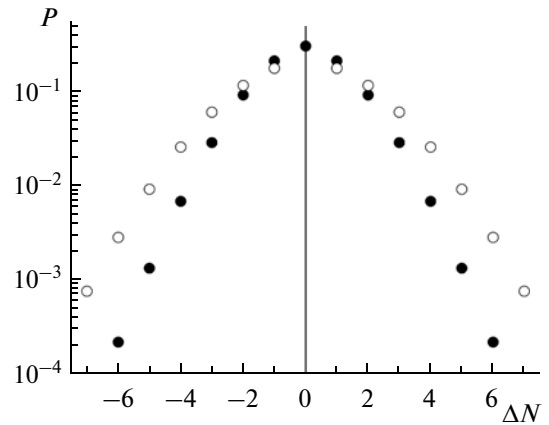


Рис. 1. Графики вероятностного распределения (2) для средних чисел подхваченных и сорванных нейтронов $q^{\nu P} = 1, q^{\nu S} = 1$ (точки) и $q^{\nu P} = 2, q^{\nu S} = 2$ (кружки).

Результирующее распределение получается усреднением этих вероятностей по прицельным параметрам (моментам) столкновения с учетом неупругих процессов сталкивающихся ядер. Значения параметров $q^{\nu P}, q^{\pi P}, q^{\nu S}, q^{\pi S}$ в квазиклассической модели Винтера зависят от свойств одночастичных состояний в сталкивающихся ядрах, главным образом, от энергии (Q -value), выделяемой ($Q > 0$) или поглощаемой ($Q < 0$) при подхвате и срыве нуклона, и плотностей уровней нуклонов g вблизи уровня Ферми

$$g^{\nu} = \frac{3N}{2\varepsilon^{\nu}} \frac{15}{\delta^{\nu}}, \quad g^{\pi} = \frac{3Z}{2\varepsilon^{\pi}} \frac{15}{\delta^{\pi}}, \quad (4)$$

где $\delta^{\nu}, \delta^{\pi}$ – варьируемые параметры со стандартным значением $\delta^{\nu} = \delta^{\pi} = 8$ и

$$\varepsilon^{\nu} = 52 - 22 \frac{N - Z}{A} - 8, \quad (5)$$

$$\varepsilon^{\pi} = 52 + 22 \frac{N - Z}{A} - \frac{Ze^2}{1.2A^{1/3}} - 8.$$

Параметры $\delta^{\nu}, \delta^{\pi}$ могут быть связаны с так называемым параметром плотности уровней ферми-газа [6]

$$a = \frac{\pi^2 g(\varepsilon_F)}{6} = \frac{\pi^2}{6} (g^{\nu} + g^{\pi}). \quad (6)$$

Значения ферми-газового параметра плотности уровней a , полученные из анализа экспериментальных данных по среднему расстоянию между нейтронными резонансами, и кривые зависимости параметра a , найденные по формуле (6) для четырех значений параметра $\delta^{\nu} = \delta^{\pi} = 5, 8, 10, 20$, показаны на рис. 2а. Зависимость для реакции $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ средних чисел подхваченных и сорван-

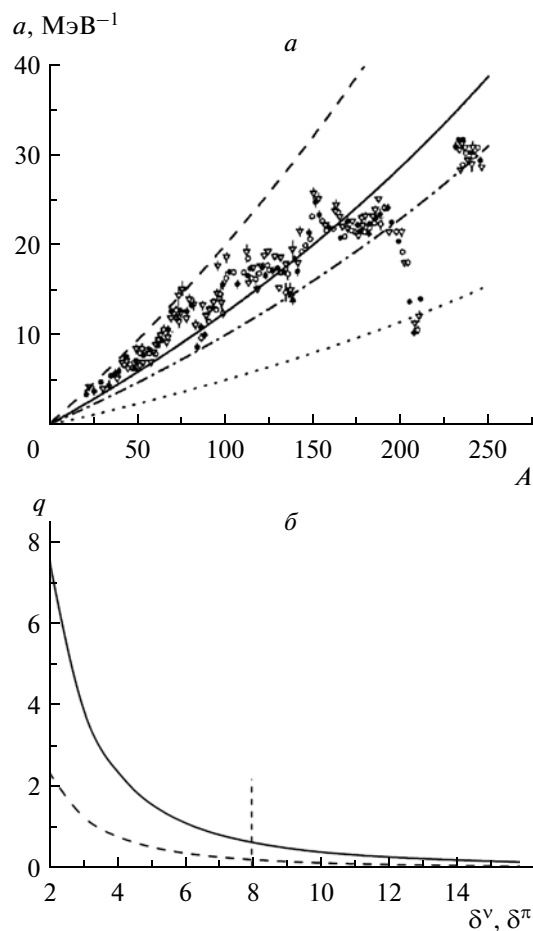


Рис. 2. *a* — значения ферми-газового параметра плотности уровней a , полученные в [6] из анализа экспериментальных данных по среднему расстоянию между нейтронными резонансами, \circ — четно-четные ядра; ∇ — четно-нечетные ядра; \triangle — нечетно-четные ядра; \bullet — нечетно-нечетные ядра, и кривые зависимости параметра a , найденные по формуле (6) для четырех значений параметра $\delta = \delta^{\nu} = \delta^{\pi} = 5$ — штриховая, 8 — сплошная, 10 — штрих-пунктирная, 20 — точечная кривые соответственно; *b* — зависимость для реакции $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ средних чисел подхваченных нейтронов и сорванных протонов (сплошная и штриховая кривые соответственно) от параметров $\delta^{\nu}, \delta^{\pi}$; вертикальная штриховая линия указывает стандартное для программы GRAZING значение $\delta^{\nu} = \delta^{\pi} = 8$.

ных нейтронов (ν) и протонов (π) и сечений от параметров $\delta^{\nu}, \delta^{\pi}$, определяющих плотности нуклонных уровней вблизи уровня Ферми в сталкивающихся ядрах, показана на рис. 2б. Полные сечения образования ядер с различными массовыми числами из начального ядра-снаряда ^{40}Ca при столкновении с ядром ^{96}Zr $E_{lab} = 152$ МэВ показаны на рис. 3а.

Интервалы потерь энергии налетающим ядром в программе GRAZING ограничены несколькими низколежащими колебательными квантами (кванд-

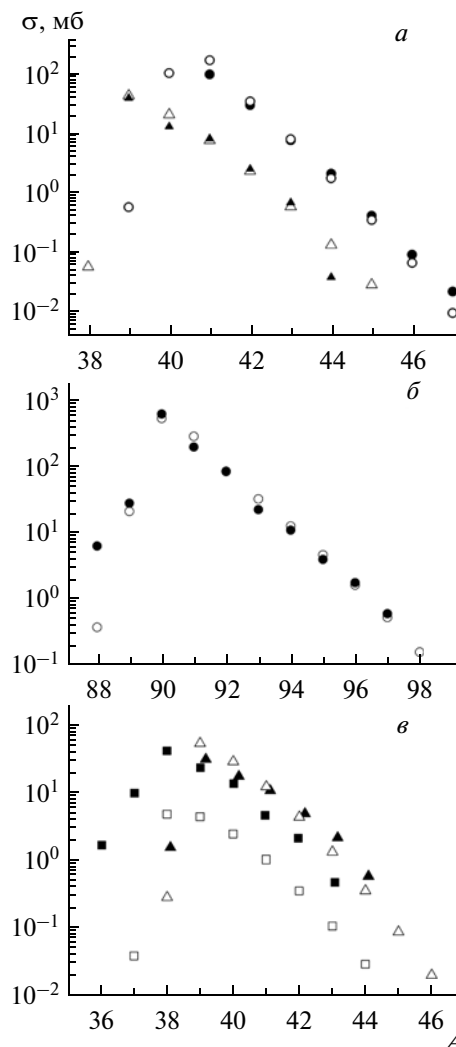


Рис. 3. Полные сечения для чистого нейтронного подхвата (кружки) и подхвата нейтронов со срывом одного (треугольники) и двух протонов (квадраты) в реакциях $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ с $E_{lab} = 152$ МэВ (*a*), $^{90}\text{Zr} + ^{208}\text{Pb}$ с $E_{lab} = 560$ МэВ (*b*) и $^{40}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ с $E_{lab} = 249$ МэВ (*e*). Сплошные значки — экспериментальные данные [4] (*a, б*), [12, 13, 14] (*e*), пустые значки — расчеты по программе GRAZING с $\delta^{\nu} = \delta^{\pi} = 6$ (*a*), $\delta^{\nu} = \delta^{\pi} = 8.5$ (*б*) и $\delta^{\nu} = \delta^{\pi} = 8$ (*e*).

рупольными и октупольными) и энергией гигантского дипольного резонанса, т.е. порядка 20 МэВ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные данные по малонуклонным передачам в реакциях $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$, $^{90}\text{Zr} + ^{208}\text{Pb}$, $^{40}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ из работ [4, 7–9] были сопоставлены с результатами расчетов с помощью программы GRAZING. Как показано на рис. 3а,б, по передачам нескольких (до 8) нейтронов имеется хоро-

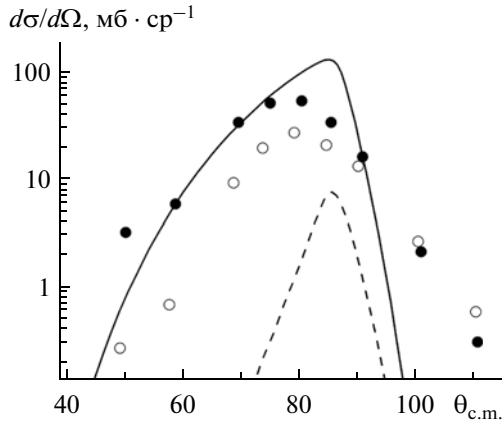


Рис. 4. Рассчитанные по программе GRAZING с $\delta^v = \delta^\pi = 8$ угловые распределения в системе центра масс для чистого нейтронного подхвата (сплошная кривая) и подхвата нейтронов со срывом двух протонов (штриховая кривая) в реакции $^{40}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ с $E_{lab} = 249$ МэВ. Точки и кружки – экспериментальные данные [13].

шее согласие между результатами расчетов и экспериментальными данными, которое почти не нарушает сопутствующая передача одного протона, а вот расчетные сечения с двумя переданными протонами уже сильно недооценивают данные эксперимента (рис. 3б). Это детально видно из угловых распределениях (дифференциальных сечений) реакции передачи $^{40}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$, представленных на рис. 4. Аналогичная картина имеет место для по малонуклонных передач в реакциях $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ [10–12], $^{32}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ [13], $^{48}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ [14], $^{58}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ [15].

В реакции $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ (рис. 3а) передача до шести нейтронов ядру Ca и до двух протонов ядру ^{96}Zr указывают на то, что среднее число подхваченных при наиболее близком касательном столкновении ядер порядка единицы (см. рис. 1), среднее число сорванных протонов при этом примерно в 3 раза меньше. Расчеты с программой GRAZING удовлетворительно воспроизводят такие значения. Хотя при стандартном наборе параметров результаты расчетов с помощью программы GRAZING несколько отличаются от экспериментальных данных (при больших числах переданных нейтронов до порядка), включением учета испарения и небольшим варьированием параметров δ^v , δ^π вблизи стандартного значения $\delta^v = \delta^\pi = 8$ согласие теории и эксперимента улучшается. В соответствии с рис. 2а для легких ядер более точный учет плотности нуклонных уровней вблизи уровня Ферми требует уменьшения значения параметров δ^v , δ^π (в частности, для $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ до 6). Для тяжелых ядер вблизи

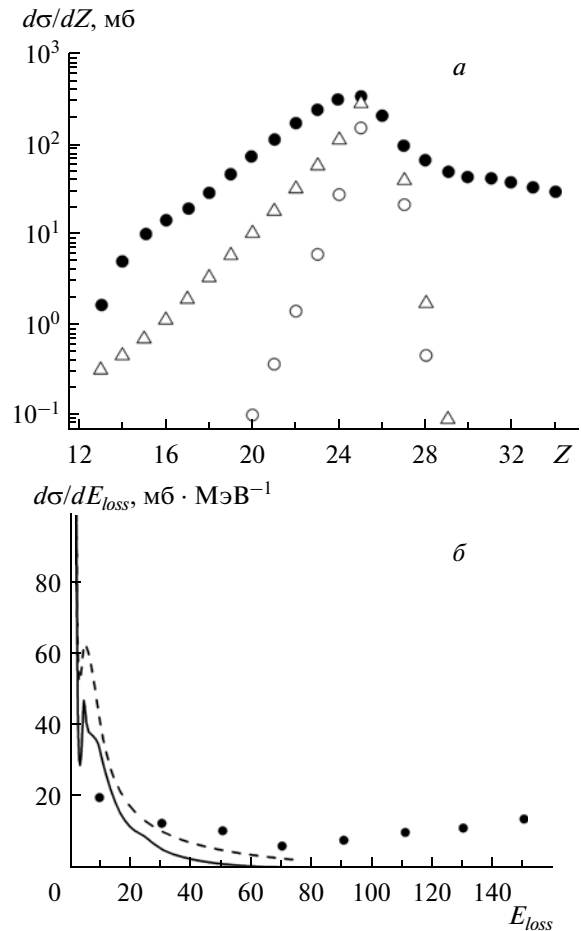


Рис. 5. Зарядовые (а) и энергетические (б) распределения продуктов реакции $^{56}\text{Fe} + ^{165}\text{Ho}$ с $E_{lab} = 462$ МэВ. Точки – экспериментальные данные [16], расчеты по программе GRAZING с параметрами $\delta^v = \delta^\pi = 8$ показаны кружками и сплошной линией, с $\delta^v = \delta^\pi = 3$ – треугольниками и штриховой линией.

свинца необходимо небольшое увеличение значений δ^v , δ^π (в частности, для $^{90}\text{Zr} + ^{208}\text{Pb}$ до 8.5).

Многонулонные передачи и глубоко неупругие реакции не описываются данной моделью. Это видно на примере реакции $^{56}\text{Fe} + ^{165}\text{Ho}$ [16] (см. рис. 5). Экспериментальные данные по многопротонным передачам и результаты расчетов по программе GRAZING одного порядка в узком интервале, соответствующем срыву и подхвату одного протона (см. рис. 5а). Вне этого интервала различие составляет несколько порядков. Программа GRAZING позволяет также описать энергетические распределения в малой окрестности (шириной порядка 20 МэВ) начальной энергии (см. рис. 5б). Аналогичная картина имеет место для многонулонных передач и больших передач энергии в реакциях $^{86}\text{Kr} + ^{166}\text{Er}$ [17–19], $^{84}\text{Kr} + ^{209}\text{Bi}$ [20], $^{136}\text{Xe} + ^{209}\text{Bi}$ [21–24].

Таким образом, квазиклассическая модель Винтера и ее компьютерная реализация — программа GRAZING достаточно хорошо описывают нейтронные передачи от одного до нескольких (6–8) нейтронов для ядер, близких к магическим ядрам ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{208}Pb , для которых характерна сравнительно малая плотность нейтронных уровней вблизи уровня Ферми. Передачи большего числа протонов в рассмотренной модели недооцениваются. Малые потери энергии в пределах до 20 МэВ в модели описываются удовлетворительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты и сравнение с экспериментальными данными позволяют лучше представлять возможности и границы применимости программы GRAZING. Это полезно и при анализе экспериментальных данных, и для совершенствования теоретических моделей касательных ядро-ядерных столкновений, и при планировании новых экспериментов, в том числе по получению новых атомных ядер вблизи границ протонной и нейтронной стабильности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 11-07-00583-а. Автор выражает благодарность за полезное обсуждение профессору В.И. Загребяеву, а также А.В. Карпову, А.С. Деникину, Ю.А. Музычке и М.А. Науменко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Winther A.* // Nucl. Phys. A 1995. V. 594. P. 203
2. *Winther A.* // Nucl. Phys. A 1994. V. 572. P. 191
3. <http://personalpages.to.infn.it/~nanni/grazing/>
4. *Szilner S. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. 024604.
5. База знаний по низкоэнергетическим ядерным реакциям Nuclear Reaction Video <http://nr.v.jinr.ru/nrv/>.
6. *Игнатюк А.В.* Статистические свойства возбужденных атомных ядер. М.: Энергоатомиздат, 1983. 176 с.
7. *Szilner S. et al.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. 044610.
8. *Pollarolo G.* // AIP Conf. Proc. 2006. V. 853. № 29. P. 29.
9. *Corradi L., Pollarolo G., Szilner S.* // J. Phys. G: 2009. V. 36. 113101.
10. *L. Corradi et al.* // Phys. Rev. C. 1996. V. 54. P. 201.
11. *Corradi L. et al.* // Phys. Rev. C. 2000. V. 61. 024609.
12. *Corradi L.* // Nucl. Phys. A. 2001. V. 685. P. 37c.
13. *Corradi L. et al.* // Phys. Rev. C. 1994. V. 49. P. 2875.
14. *Rehm K.E. et al.* // Phys. Rev. C 1988 V. 37. P. 2629.
15. *Corradi L., Pollarolo G., Winther A.* // Phys. Rev. C. 2002. V. 66. 024606.
16. *Hoover A.D., et al.* // Phys. Rev. C. 1982. V. 25. P. 256.
17. *Eyal Y. et al.* // Phys. Rev. C. 1980. 1980. V. 21. P. 2509.
18. *Tserruya I. et al.* // Phys. Rev. Lett. C. 1981. V. 47. P. 16.
19. *Tserruya I. et al.* // Phys. Rev. C. 1982. V. 26. P. 2509.
20. *Birkelund J.R. et al.* // Phys. Rev. C. 1982. V. 26. P. 1984.
21. *Schroder W.U. et al.* // Phys. Rep. 1978. V. 45. P. 301.
22. *Wilcke W.W. et al.* // Phys. Rev. C. 1980. V. 22. P. 128.
23. *Wollersheim H.J. et al.* // Phys. Rev. C. 1981. V. 24. P. 2114.
24. *Bondorf J.P. et al.* // Phys. Rev. C. 1993. V. 48. P. 459.