

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ^{97}Ru В РАМКАХ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОЛЛЕКТИВНОЙ МОДЕЛИ

А. А. Куртева, В. Е. Митрошин¹

¹Харьковский национальный университет им. В. М. Каразина

На основе динамической коллективной модели рассчитаны значения энергии, спины, четности, магнитные дипольные и электрические квадрупольные моменты, спектроскопические факторы основного и возбужденных состояний ^{97}Ru , а также приведенные вероятности электромагнитных переходов между ними и приведенные вероятности β -переходов между основным состоянием ^{97}Ru и возбужденными состояниями ^{97}Ru . Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Динамическая коллективная модель (ДКМ) [1] позволяет единообразно описывать сферические, переходные и деформированные ядра.

В работе [2] в рамках ДКМ получены выражения для приведенных матричных элементов гамильтониана слабого взаимодействия. В них учтено 12 классов диаграмм, отражающих влияние на вероятности β -переходов вакуумных флуктуаций и различных эффектов некоммутируемости одноквазичастичных и коллективных мод. В работах других авторов учитывается только прямой β -распад, что соответствует учету одной диаграммы [3 - 7].

Полученные выражения были использованы при описании β -распада $^{111,113,115}\text{Sb}$ [2], ^{99}Rh [8], ^{95}Tc [9], ^{97}Ru [10], ^{95}Ru [11], ^{99}Tc [12]. Проведенные расчеты позволили получить важную информацию о структуре ядер, так как вероятности β -переходов очень чувствительны к структуре состояний.

В настоящей работе продолжено изучение цепочки распадчиков с $A = 97$. В первом разделе описываются свойства возбужденных состояний ^{97}Ru , во втором - анализируются приведенные вероятности β -переходов для β -распада $^{97}\text{Rh} \rightarrow ^{97}\text{Ru}$, в третьем - проведено краткое обсуждение различных точек зрения при идентификации возбужденных состояний ^{97}Ru . Проводится сравнение рассчитанных и имеющихся экспериментальных значений.

Возбужденные состояния ^{97}Ru

В рамках ДКМ рассчитаны значения энергии, спины, четности, магнитные дипольные и электрические квадрупольные моменты основного и возбужденных состояний ^{97}Ru , а также приведенные вероятности электромагнитных переходов между ними. В работе [1] подробно описана методика этих расчетов.

На рис. 1 представлена часть схемы уровней ^{97}Ru , а в табл. 1 приведено сравнение экспериментальных и рассчитанных значений энергии для некоторых уровней ^{97}Ru , а также их рассчитанные магнитные и квадрупольные моменты, спектроскопические факторы (S^+ - для реакции срыва, S^- - для реакции подхвата). Сравнение проведено с экспериментальными данными из работ [13 - 16]. В [15] приведено только одно экспериментальное значение магнитного момента для основного состояния $\mu = (-)0,787(8)$ я.м. Необходимо отметить, что в работах [13, 14] приведены различные уровни со спинами $15/2^-$ и $19/2^-$, но нет уровней со спинами $13/2^-$ и $17/2^-$, которые получаются в наших расчетах. Переход 717 кэВ в работе [13] размещен между уровнями $23/2^-$ и $19/2^-$, а в работе [14] - между уровнями $15/2^-$ и $11/2^-$. В табл. 1 и на рис. 1 приведены данные из обеих работ.

В результате проведенных расчетов установлено наличие у ^{97}Ru трех вибрационных полос с $\Delta I = 2$, образованных главным образом взаимодействием нечетного нейтрона в состояниях $d_{5/2}$, $g_{7/2}$ и $h_{11/2}$ с ираст-полосой четно-четного остова ^{96}Ru . К полосе с основанием $5/2_1^+$ относим уровни со спинами: $5/2_1^+$ - $9/2_1^+$ - $13/2_1^+$ - $17/2_1^+$ - $21/2_1^+$ (на рис. 1 она расположена слева, энергии ее уровней в табл. 1 помечены одной звездочкой). К полосе с основанием $7/2_1^+$ относим

следующие уровни: $7/2_1^+$ -

$11/2_1^+$ - $15/2_1^+$ - $19/2_1^+$ - $23/2_1^+$ (на рис. 1 - вторая слева, в табл. 1 энергии ее уровней помечены двумя звездочками). К полосе с основанием $11/2_1^-$ относим уровни $11/2_1^-$ - $15/2_1^-$ - $19/2_1^-$, а также $11/2_1^-$ - $13/2_1^-$ - $17/2_1^-$, полоса дублетная (на рис. 1 - третья слева, в табл. 1 энергии ее уровней помечены тремя звездочками). Расстояния между уровнями полос сопоставимы с соответствующими расстояниями между уровнями ираст-полосы четно-четного остова. Энергии уровней ираст-полосы ^{96}Ru соответственно равны: 2_1^+ - 832,6 кэВ, 4_1^+ - 1518,0 кэВ, 6_1^+ - 2149,8 кэВ, 8_1^+ - 2950,4 кэВ. Как видно из табл. 1, магнитные моменты уровней одной полосы имеют одинаковые знаки.

Таблица 1. Экспериментальные и рассчитанные значения энергии, спины и четности, рассчитанные магнитные и квадрупольные моменты, спектроскопические факторы для некоторых состояний ^{97}Ru

$E_{\text{эксп.}}, \text{кэВ}$	$E_{\text{расч.}}, \text{кэВ}$	I^π	$\mu, \text{я.м.}$	$Q, \text{б}$	S^+	S^-
0	0*	$5/2_1^+$	-1,36	-0,25	0,70	0,47
189	206	$3/2_1^+$	-0,51	-0,04	0,27	0,02
422	445**	$7/2_1^+$	0,98	-0,43	0,74	0,19
880	880*	$9/2_1^+$	-1,33	-0,18	0,09	0,11
840	1340	$7/2_2^+$	-1,05	-0,27	0,06	0,07
1200	1118**	$11/2_1^+$	1,3	-0,27	0,00	0,00
1229	1554	$9/2_2^+$	1,01	-0,34	0,05	0,02
1826	1771*	$13/2_1^+$	-1,32	-0,18	0,00	0,00
1846	1862**	$15/2_1^+$	1,45	-0,22	0,00	0,00

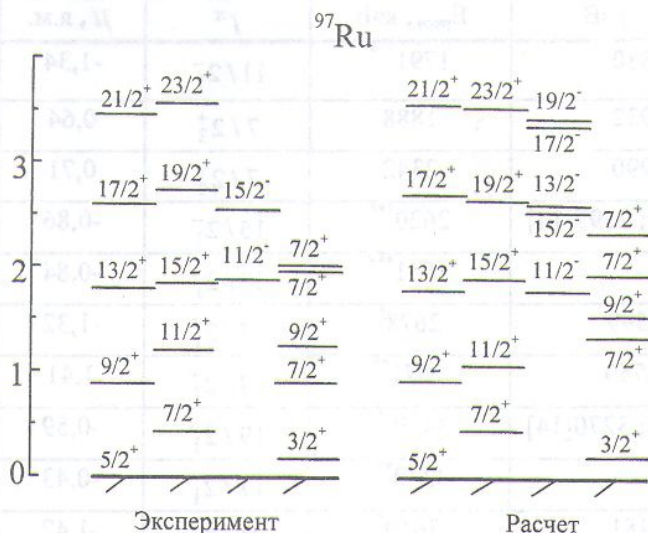


Рис. 1. Часть схемы уровней ^{97}Ru .

Продолжение табл. 1

$E_{\text{экс.}}, \text{кэВ}$	$E_{\text{расч.}}, \text{кэВ}$	I^{π}	$\mu, \text{я.м.}$	$Q, \text{б}$	S^+	S^-
1880	1791 ^{***}	11/2 ₁ ⁻	-1,34	-0,66	0,71	0,08
1932	1888	7/2 ₃ ⁺	0,64	-0,11	0,38	0,05
1990	2342	7/2 ₄ ⁺	0,71	0,13	0,01	0,03
2553[13]; 2597[14]	2620 ^{***}	15/2 ₁ ⁻	-0,86	-0,47	0,00	0,00
-	2651 ^{***}	13/2 ₁ ⁻	-0,84	-0,56	0,00	0,00
2599	2678 [*]	17/2 ₁ ⁺	-1,32	-0,19	0,00	0,00
2759	2671 ^{**}	19/2 ₁ ⁺	1,41	-0,20	0,00	0,00
3226[13]; 3270[14]	3450 ^{***}	19/2 ₁ ⁻	-0,59	-0,38	0,00	0,00
-	3340 ^{***}	17/2 ₁ ⁻	-0,43	-0,46	0,00	0,00
3481	3610 [*]	21/2 ₁ ⁺	-1,47	-0,19	0,00	0,00
3626	3540 ^{**}	23/2 ₁ ⁺	1,15	-0,19	0,00	0,00

Приведенные вероятности внутривибрационных E2-переходов велики и представлены в табл. 2 в e^2b^2 и одночастичных единицах. Сначала даны приведенные вероятности возбуждения уровней для полосы с основанием 5/2₁⁺, потом для полосы с основанием 7/2₁⁺, далее для полосы с основанием 11/2₁⁻.

Таблица 2. Рассчитанные значения энергии и приведенные вероятности возбуждения состояний вибрационных полос ⁹⁷Ru

$E_i, \text{кэВ}$	I_i	$E_f, \text{кэВ}$	I_f	$B(E2), e^2b^2$	$B(E2), \text{W.u.}$
0	5/2 ⁺	880	9/2 ⁺	0,0857	32,4
880	9/2 ⁺	1771	13/2 ⁺	0,1344	50,8
1771	13/2 ⁺	2678	17/2 ⁺	0,1779	67,2
2678	17/2 ⁺	3610	21/2 ⁺	0,2192	82,8
445	7/2 ⁺	1118	11/2 ⁺	0,0874	33,0
1118	11/2 ⁺	1862	15/2 ⁺	0,1411	53,3
1862	15/2 ⁺	2671	19/2 ⁺	0,1853	70,0
2671	19/2 ⁺	3540	23/2 ⁺	0,2243	84,7
1791	11/2 ⁻	2620	15/2 ⁻	0,0664	25,1
2620	15/2 ⁻	3450	19/2 ⁻	0,1218	46,0
3450	19/2 ⁻	4324	23/2 ⁻	0,1697	64,1
1791	11/2 ⁻	2651	13/2 ⁻	0,0389	14,7
2651	13/2 ⁻	3340	17/2 ⁻	0,0943	35,6
3340	17/2 ⁻	4142	21/2 ⁻	0,1497	56,6

В табл. 3 представлено сравнение имеющихся экспериментальных и рассчитанных приведенных вероятностей M1- и E2-переходов. В ней указаны экспериментальные значения энергии, приведенные вероятности разрядки даны в одночастичных единицах. Звездочками помечены B(E2) из работы [17], остальные экспериментальные значения взяты из [15]. Следует заметить, что для первого и третьего из переходов экспериментальные B(E2) отличаются между собой сильнее, чем рассчитанные от одной из экспериментальных. Рассчитанные B(E2) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, а расхождения между рассчитанными и экспериментальными B(M1) велики.

Таблица 3. Сравнение экспериментальных и рассчитанных приведенных вероятностей электромагнитных переходов для ^{97}Ru

$E_{\text{ур.}}$, кэВ	E_{γ} , кэВ	I_i	I_f	$B(M1), W.u.$ эксперимент	$B(M1), W.u.$ расчет	$B(E2), W.u.$ эксперимент	$B(E2), W.u.$ расчет
189	189	$3/2^+$	$5/2^+$	0,0122(12)	0,0068	30(13) 175(16)	11,3
421	421	$7/2^+$	$5/2^+$	0,0164(17)*	0,00075		
1199	778	$11/2^+$	$7/2^+$			17(4) 6,0(9)*	22
1845	648	$15/2^+$	$11/2^+$			13(19) 16(2)*	39,9

Бета-распад $^{97}\text{Rh} \rightarrow ^{97}\text{Ru}$

В работе [2] приведен подробный вывод выражений для приведенных матричных элементов гамильтониана слабого взаимодействия и диаграммы, которые соответствуют слагаемым, входящим в эти формулы. Одно из этих выражений использовано при расчете β^+ -распада нечетно-протонного ядра ^{97}Rh . Рассмотрены фермиевские и гамов-теллеровские переходы с одноквазичастичного основного состояния ^{97}Rh , волновая функция которого содержит значительную примесь одночастичного состояния $g_{9/2}$, на возбужденные состояния ^{97}Ru . Проведено сравнение с экспериментальными данными из [15, 16, 18], результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения $\log(ft)$ для бета-распада $^{97}\text{Rh} \rightarrow ^{97}\text{Ru}$

I^π	$7/2_1^+$	$7/2_2^+$	$9/2_1^+$	$11/2_1^+$	$9/2_2^+$	$7/2_3^+$	$7/2_4^+$
$E_{\text{экс.}}$, кэВ	422	840	880	1200	1229	1932	1990
$\log(ft)$, эксперимент	5,2	5,8	5,9	6,2	5,9	5,3	6,1
$\log(ft)$, расчет	5,2	7,1	7,4	7,9	6,1	5,5	5,8

На рис. 2 представлены зависимости рассчитанных значений $\log(ft)$ от количества учитываемых классов диаграмм согласно рис. 3 работы [2] для β -распада $^{97}\text{Rh} \rightarrow ^{97}\text{Ru}$. В целом поведение этих зависимостей типично для β^+ -распада нечетно-протонного ядра. Переходы на одноквазичастичные состояния $7/2_1^+$ и $7/2_3^+$, волновые функции которых содержат значительные примеси одночастичного состояния $g_{7/2}$, происходят с большой вероятностью. Переходы с одноквазичастичного основного состояния ^{97}Rh на состояния $7/2_2^+$ и $9/2_1^+$ ^{97}Ru , волновые функции которых имеют значительную примесь $[d_{5/2} \otimes 2_1^+]$, являются запрещенными переходами, линейные и квадратичные по амплитудам фононов диаграммы дают существенный вклад в конечные значения $\log(ft)$. Переход на коллективное состояние $11/2_1^+$, волновая функция которого содержит значительную примесь $[g_{7/2} \otimes 2_1^+]$ происходит с малой вероятностью. Необходимо отметить, что для переходов на состояния со спинами $7/2_2^+$, $9/2_1^+$ и $11/2_1^+$ рассчитанные значения $\log(ft)$ значительно больше экспериментальных. Большие рассчитанные значения $\log(ft)$ подтверждают, что природа этих состояний дочернего ядра отличается от природы основного состояния материнского ядра.

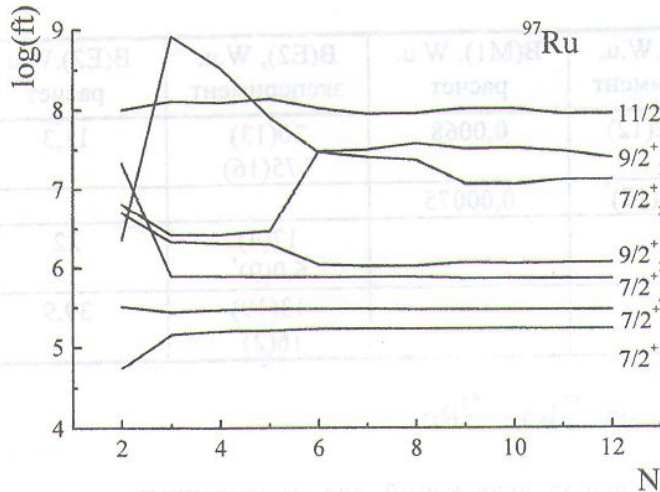


Рис. 2. Зависимости $\log(ft)$ от количества учитываемых классов диаграмм.

В работе [8] мы изучали β -распад $^{99}\text{Rh} \rightarrow ^{99}\text{Ru}$. В этом β -распаде экспериментальные значения $\log(ft)$ для переходов на состояния $9/2_1^+$ и $11/2_1^+$ равны 6,8 и 7,8 соответственно и хорошо согласуются с нашими расчетами. Получается, что для двух соседних изотопов рутения, структура возбужденных состояний которых похожа, экспериментальные значения $\log(ft)$ для переходов на состояния $9/2_1^+$ и $11/2_1^+$ значительно отличаются. С подобной ситуацией мы сталкивались при изучении бета-распада $^{111,113,115}\text{Sb}$, когда

для перехода на состояние $5/2_3^+$ ^{111}Sn рассчитанное значение $\log(ft)$ тоже было значительно больше экспериментального, а для двух соседних изотопов согласие было вполне удовлетворительным (рис. 5 и табл. 6 в [2]). Поэтому предполагаем, что для ^{97}Ru экспериментальные значения $\log(ft)$ для переходов на состояния со спинами $7/2_2^+$, $9/2_1^+$ и $11/2_1^+$ измерены с большой погрешностью.

Обсуждение

В литературе продолжается спор о наличии коллективных состояний в нечетных ядрах с числом нейтронов $N \leq 55$, которые принято называть сферическими. Авторы работы [20] говорят о взаимодействии нечетного нейтрона в одночастичных состояниях $d_{5/2}$, $g_{7/2}$, $h_{11/2}$ с состояниями остова, в результате чего образуются коллективные состояния. Авторы работы [14] признают наличие у ^{97}Ru только слабой развязанной полосы с основанием $11/2^-$. Главной целью работ [13, 17] было именно изучение вопроса о наличии коллективных состояний в $^{96,97,98}\text{Ru}$. Специально был проведен эксперимент, в котором в реакции $^{65}\text{Cu}(^{36}\text{S}, p, xn)^{96,97,98}\text{Ru}$ ($x = 4, 3, 2$) изучались возбужденные состояния конечных ядер. Рассмотрены возбужденные состояния ^{97}Ru вплоть до 17 МэВ, измерены несколько вероятностей электромагнитных переходов, проведены расчеты структуры возбужденных состояний ^{97}Ru по оболочечной модели и по модели слабой связи. В результате авторы этих работ приходят к выводу, что возбужденные состояния в ^{97}Ru являются одночастичными, а вопрос о наличии коллективных состояний остается открытым. Но в их экспериментальной схеме уровней на рис. 4 изображена часть полосы с основанием $7/2_1^+$, а измеренная ими вероятность E2-перехода $15/2_1^+ \rightarrow 11/2_1^+$ равна $16(2) \text{ W.u.}$ Кроме того, в работе [13] приведены результаты расчетов по модели слабой связи, на рис. 11 нарисованы три полосы состояний (которые нигде не названы полосами) и проведено сопоставление с ираст-полосой ^{96}Ru . Считаем, что у ^{97}Ru в диапазоне энергий от 0 до 3 МэВ присутствуют три вибрационные полосы, подробно описанные в первом разделе. Большие рассчитанные значения $\log(ft)$ для состояний $7/2_2^+$, $9/2_1^+$ и $11/2_1^+$ тоже являются подтверждением их коллективной природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крыгин Г. Б., Митрошин В. Е. Зарядовые радиусы и структура атомных ядер // ЭЧАЯ. - 1985. - Т.16. - С. 927 - 965.
2. Вероятности бета-переходов и структура ядер / И. Н. Вишневский, Г. Б. Крыгин, А. А. Куртева, В. Е. Митрошин, В. В. Тришин // ЯФ. - 1994. - Т. 57, № 1. - С. 17 - 33.
3. *Toivanen J., Suhonen J.* Microscopic quasiparticle-phonon description of odd-mass $^{127-133}\text{Xe}$ isotopes and their β decay // Phys. Rev. C. - 1998. - Vol. 57, No. 3. - P. 1237 - 1245.
4. *Homma H., Bender E., Hirsch M. et al.* Systematic study of nuclear β decay // Phys. Rev. C. - 1996. - Vol. 54, No. 6. - P. 2972 - 2985.
5. *Weissman L., Andreyev A., Bruyneel B. et al.* β decay of ^{67}Co // Phys. Rev. C. - 1999. - Vol. 59, No. 4. - P. 2004 - 2008.
6. *Lhersonneau G., Suhonen J., Dendooven P. et al.* Level structure of ^{99}Nb // Phys. Rev. C. - 1998. - Vol. 57, No. 6. - P. 2974 - 2990.
7. *Suhonen J., Civitarese O.* Systematic QRPA study of β^- and β^+ / EC decay transitions to excited states of $^{110-114}\text{Cd}$ and $^{114-122}\text{Sn}$ // Nucl. Ph. A. - 1995. - Vol. 584. - P. 449 - 466.
8. Бета-распад $^{99}\text{Rh} \rightarrow ^{99}\text{Ru}$ / И. Н. Вишневский, Г. Б. Крыгин, А. А. Куртева, В. Е. Митрошин // Тез. докл. Междунар. 48-го совещ. по ядерной спектроскопии и структуре ядра. - М.: Наука, 1998. - С. 87.
9. Бета-распад ^{95}Tc на возбужденные состояния ^{95}Mo / И. Н. Вишневский, Г. Б. Крыгин, А. А. Куртева, В. Е. Митрошин // Збірник наукових праць Ін-ту ядерних досл. - Киев, 2000. - № 2. - С. 28 - 33.
10. Бета-распад $^{97}\text{Ru} \rightarrow ^{97}\text{Tc}$ / И. Н. Вишневский, Г. Б. Крыгин, А. А. Куртева, В. Е. Митрошин // Изв. РАН. Сер. физ. - 1998. - Т. 62, № 5. - С. 893 - 895.
11. Бета-распад $^{95}\text{Ru} \rightarrow ^{95}\text{Tc}$ / И. Н. Вишневский, Г. Б. Крыгин, А. А. Куртева, В. Е. Митрошин // Матеріали щорічн. наук. конф. Ін-ту ядерних досл. НАН України - Київ, 1998. - С. 48 - 50.
12. Бета-распад $^{99}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Ru}$ / И. Н. Вишневский, Г. Б. Крыгин, А. А. Куртева, В. Е. Митрошин // Тез. докл. Междунар. 48-го совещ. по ядерной спектроскопии и структуре ядра. - М.: Наука, 1998. - С. 86.
13. *Kharraja B., Ghugre S.S., Garg U. et al.* Level structures of $^{96,97,98}\text{Ru}$ at high angular momentum // Phys. Rev. C. - 1998. - Vol. 57, No. 1. - P.83 - 96.
14. *Chowdhury P., Brown B.A., Garg U. et al.* Nuclear structure in $^{95,97}\text{Ru}$ nuclei // Phys. Rev. C. - 1985. - Vol. 32, No. 4. - P. 1238 - 1246.
15. *Tuli J.K.* // Nuclear Data Sheets. - 1993. - Vol. 70, No. 1. - P. 145 - 155.
16. Evaluated Nuclear Structure Data File.
17. *Kharraja B., Garg U., Ghugre S.S. et al.* Recoil-distance lifetime measurement in $^{96,97,98}\text{Ru}$: Search for possible onset of collectivity at $N \geq 52$ // Phys. Rev. C. - 1999. - Vol. 61, 024301. - P.1 - 7.
18. *Ohya S.* Nuclear structure studies of ^{97}Ru from the decay of $^{97g,m}\text{Rh}$ // Nucl. Phys. - 1974. - Vol. A235. - P. 361 - 377.
19. *Singh B., Cox R. J., Kukoc A. H. et al.* A study of the gamma rays emitted by ^{97}Nb // Nucl. Ph. A. - 1969. - Vol. 129. - P. 104 - 112.
20. *Carnes K. D., Rickey F. A., Samudra G. S. et al.* Particle-core multiplets in ^{97}Mo populated via the $(^3\text{He}, 2n \gamma)$ reaction // Phys. Rev. C. - 1987. - Vol. 35, No. 2. - P.525 - 533.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ^{97}Ru В РАМКАХ
ДИНАМІЧНОЇ КОЛЕКТИВНОЇ МОДЕЛІ**

Г. П. Куртева, В. Е. Митрошин

На основі динамічної колективної моделі розраховано значення енергії, спіни, парності, магнітні дипольні й електричні квадрупольні моменти, спектроскопічні фактори основного та збуджених станів ^{97}Ru , а також зведені ймовірності електромагнітних переходів між ними та зведені ймовірності β -переходів між основним станом ^{97}Rh та збудженими станами ^{97}Ru . Проведено порівняння отриманих результатів з існуючими експериментальними даними.

**THE INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF ^{97}Ru
IN THE FRAMEWORK OF DYNAMIC COLLECTIVE MODEL**

A. A. Kurteva, V. E. Mitroshin

The energies, spins, parities, magnetic dipole and electric quadrupole moments, spectroscopic factors of the ground and excited states of ^{97}Ru as well as the reduced probabilities of electromagnetic transitions between them have been calculated in the framework of the dynamic collective model. The reduced probabilities of β -transitions between main state of ^{97}Rh and excited states of ^{97}Ru have been calculated. Theoretical results were compared with experimental values.

Поступила в редакцию 07.03.01