

УДК 539.172.12

ОПТИКО-МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ПРОТОНА НА ЯДРЕ ${}^7\text{Li}$ С УЧЕТОМ РЕЗОНАНСНОГО ВКЛАДА

© 2023 г. Л. Н. Генералов¹, В. А. Жеребцов¹, С. М. Селянкина¹, *

¹Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

*E-mail: otd4@expd.vniief.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 14.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Выполнен оптико-модельный анализ экспериментальных данных по упругому рассеянию протона с энергиями от 0.050 до 200 МэВ на ядрах ${}^7\text{Li}$. Проанализированы все имеющиеся экспериментальные данные по дифференциальным сечениям упругого рассеяния и данные по поляризации, возникающей в этом процессе; полные сечения реакции ${}^7\text{Li} + p$. Использован наш код OptModel с энергетически зависимыми параметрами оптического потенциала и учетом резонансной составляющей упругого рассеяния. Нарушение унитарности матрицы рассеяния (суммы оптико-модельной и резонансной) наблюдается в отдельных энергетических точках и не превышает 18%.

DOI: 10.31857/S0367676523703155, EDN: QVIAEL

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] нами выполнен оптико-модельный анализ экспериментальных данных упругого рассеяния протона на ядре ${}^6\text{Li}$ с учетом резонансного вклада. В настоящей работе анализируются данные по упругому рассеянию протона на ядре ${}^7\text{Li}$ с использованием нашего кода OptModel [2, 3], имеющего энергетически зависимые параметры оптического потенциала и резонансную составляющую упругого рассеяния. Анализировались все имеющиеся экспериментальные данные по дифференциальным сечениям упругого рассеяния, возникающей в этом процессе поляризации, и полным сечениям реакции ${}^7\text{Li} + p$. Энергетический интервал анализа находился в границах энергий протонов E_p от 0.05 до 200 МэВ. Нарушение унитарности матрицы рассеяния (оптико-модельной + резонансной) имелось в отдельных энергетических точках и не превышало 18%.

АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для проведения анализа в литературных источниках выполнен поиск экспериментальных данных. Их характеристики приведены в табл. 1, где диапазон энергий налетающих частиц приведен в лабораторной системе координат (лаб), диапазон углов рассеяния — в системе центра масс (сцм), $d\sigma/d\Omega$ — дифференциальные сечения, σ — полные сечения реакции ${}^7\text{Li} + p$.

В этих данных имеются наши дифференциальные сечения в энергетических точках 5, 6, 7, 8, 9 и 10 МэВ, измеренные с погрешностью 5–7% на мишени LiF с обогащением по ${}^7\text{Li}$ до 70% и толщиной $470 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$, нанесенной на тонкую углеводородную подложку. Эти измерения на протонном пучке были такими же, что и измерения на пучке дейтронов [18]. Другой тип наших данных — полные сечения реакции ${}^7\text{Li} + p$, полученные с погрешностью 13% в интервале от 0.05 до 5 МэВ суммированием оцененных в нашей библиотеке SABA [25] парциальных сечений реакций (p, γ) , (p, α_0) , (p, xn) , (p, t) , (p, p_1) .

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИКО-МОДЕЛЬНОГО АНАЛИЗА УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ПРОТОНА НА ЯДРЕ ${}^7\text{Li}$

В анализе использовалось 3881 точка (3600 точек по дифференциальным сечениям, 78 значений поляризации и 203 точки по полным сечениям) и 190 подгоняемых параметров. На фрагменте главного окна программы OptModel (рис. 1), слева представлены данные по функциям возбуждения (на рисунке — под углами рассеяния $\theta = 125^\circ$ – 130°), справа — все имевшиеся угловые распределения, энергии протонов и углы рассеяния указаны в сцм. На рис. 2 приведены экспериментальные данные и описание дифференциальных сечений для $\theta = 90^\circ$.

Таблица 1. Краткая характеристика данных, использованных в анализе

Тип данных	Диапазон энергий, МэВ	Диапазон углов, град	Ссылка
$d\sigma/d\Omega$	0.5–1.4	50–160	[4]
$d\sigma/d\Omega$	6.868	103.2	[5]
$d\sigma/d\Omega$	3–10	60–140	[6]
$d\sigma/d\Omega$	0.8–3.6	164	[7]
$d\sigma/d\Omega$	0.2–1.4	81.1, 137.8	[8]
$d\sigma/d\Omega$	1.36	90	[9]
$d\sigma/d\Omega$	2.4–12	70, 90, 130, 150, 166.2	[10]
$d\sigma/d\Omega$	2–11	45.2, 61.5, 90, 171.4	[11]
$d\sigma/d\Omega$, поляризация	200.4	14–60	[12]
$d\sigma/d\Omega$	1.3–2.6	70, 90, 110, 130, 150, 167	[13]
поляризация	14.5	32.6–157.2	[14]
$d\sigma/d\Omega$	3–5.4	65.7–168.2	[15]
$d\sigma/d\Omega$	0.396, 0.792, 0.991	45.3–169.7	[16]
$d\sigma/d\Omega$	1.2–3.5	125.3	[17]
$d\sigma/d\Omega$	5–10	28.5–154.1	Наши измерения, [18]
$d\sigma/d\Omega$	49.75	28–154	[19]
$d\sigma/d\Omega$	181.9, 182.8	28.8–72.8	[20]
$d\sigma/d\Omega$	3–7	154.2	[21]
$d\sigma/d\Omega$	1.5–7	145.3, 154.2, 162.8, 171.4	[22]
$d\sigma/d\Omega$	2.29, 3.57, 5, 5.43	22.4–169.4	[23]
σ	25.1–48.1	—	[24]
σ	0.05–5	—	[25]
$d\sigma/d\Omega$, поляризация	12, 14, 16	22.6–167	[26]

Отметим, что качество описания этих данных хуже, чем данных по упругому рассеянию протона на ядре ${}^6\text{Li}$ [1], что обусловлено сложной энергетической зависимостью полного се-

чения реакции ${}^7\text{Li} + p$, где проявляются и пороги указанных выше парциальных каналов реакции, и их сложная резонансная структура (рис. 1 и 2).

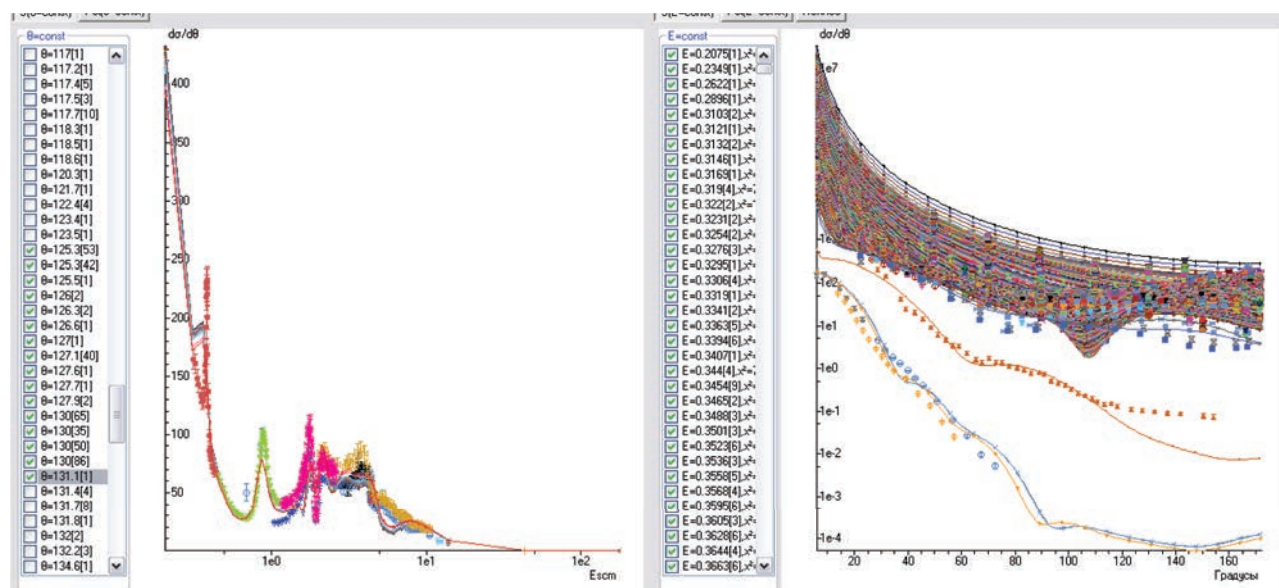


Рис. 1. Фрагмент рабочего окна программы OptModel.

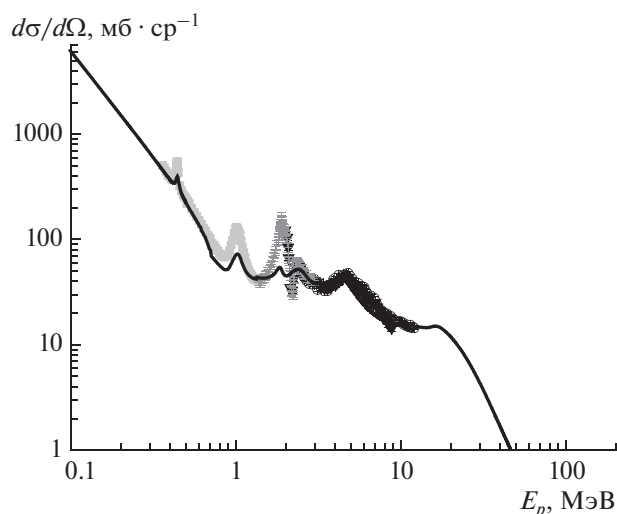


Рис. 2. Описание (сплошная линия) дифференциальных сечений при $\theta = 90^\circ$, данные из: ■ — [4], ○ — [10], ▼ — [11], + — [13].

На рис. 3 показано описание наших данных. Хорошо описаны области передних и задних углов рассеяния, однако в области угла рассеяния $110\text{--}120^\circ$ поведение экспериментальных и теоретических данных находится в “противофазе”. В целом неплохо описываются данные по поляризации (рис. 4).

Достигнутый уровень согласия теоретического описания анализируемых данных получен при

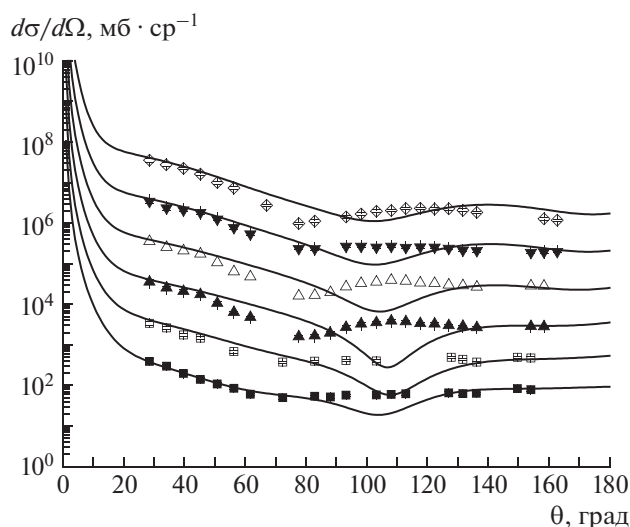


Рис. 3. Наши экспериментальные данные (точки) и их оптико-модельное описание (линии): ■ — 5 МэВ, □ — 6 МэВ ($\cdot 10$), ▲ — 7 МэВ ($\cdot 10^2$), Δ — 8 МэВ ($\cdot 10^3$), ▼ — 9 МэВ ($\cdot 10^4$), ◇ — 10 МэВ ($\cdot 10^5$).

параметрах оптического потенциала и резонансов, представленных соответственно в табл. 2 и 3. Расшифровка параметров приведена в статье [1]. Отметим, что большинство полученных значений параметров резонансов согласуются с литературными данными [27, 28], см. табл. 2, где уровни с близкими значениями энергии записаны в одну строку.

Параметры оптического потенциала, полученные нами, показаны на рис. 5–7, где также приведены литературные их значения. Видим, что литературные данные немногочисленны и противоречивы.

Отметим изменения и закономерности в значениях параметров оптического потенциала при переходе от рассеяния протонов на ядре ${}^6\text{Li}$ к рассеянию на ядре ${}^7\text{Li}$. Основное — для системы ${}^7\text{Li} + p$ увеличились V_V, r_V, a_V . При $E_p = 0$ МэВ для ${}^6\text{Li}$ значения этих параметров составляли 33.3 МэВ, 1.16 фм, 0.52 фм, а для ${}^7\text{Li}$ — 44.8 МэВ, 1.4 фм, 0.55 фм. Следует отметить, что значение радиуса, полученное в области низких энергий, вызывает некоторый вопрос. В настоящее время получено более качественное описание, позволившее решить эту проблему. Также, как и для ${}^6\text{Li}$, в параметрах $r_V, a_V, V_{SO}, r_{VSO}, a_{VSO}, W_{SO}, r_{WSO}, a_{WSO}$ рассеяния протонов на ${}^7\text{Li}$ наблюдается резонансно-подобная энергетическая зависимость.

На рис. 8 приведены полные сечения реакции ${}^7\text{Li} + p$, полученные в настоящих исследованиях, и литературные данные. Если авторы работы не привели полные сечения, то мы вычисляли их по

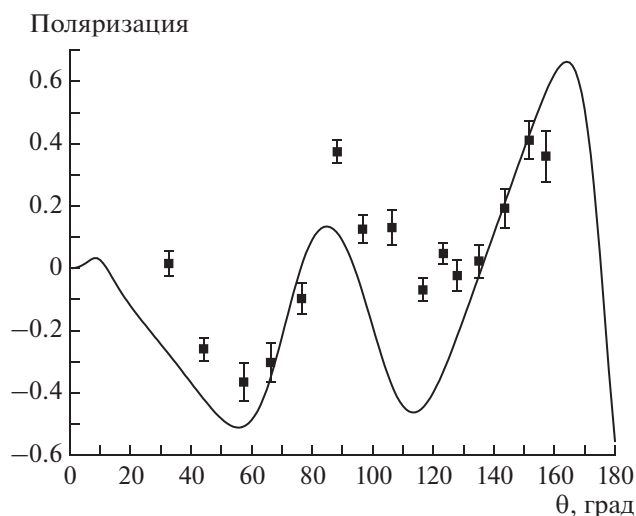


Рис. 4. Оптико-модельное описание (линии) и экспериментальные данные [14] (■) по поляризации при $E_p = 14.5$ МэВ.

Таблица 2. Параметры оптического потенциала, полученные в настоящей работе, $E_F^C = E_F^a = E_F^{VSO} = E_F^{VSOa} = E_F^{WSO} = E_F^{WSOa} = 13.615$ МэВ

$r_0^C = 1.1652$ фм		$r_1^C = 0.0997$ фм · МэВ ⁻¹		$r_2^C = 0.0039$ фм · МэВ ⁻¹		$r_3^C = 0.0677$ фм · МэВ ⁻¹	
$V_0 = 0$ МэВ	$W_0^D = 11.9785$ МэВ	$W_0^D = 1.6819$ МэВ	$V_0^{SO} = 4.9604$ МэВ	$W_0^{SO} = 2.9066$ МэВ			
$V_1 = -0.0137$	$W_1^D = 100.5018 \times 10^{-4}$ МэВ ⁻¹	$W_1^D = 2.6893 \times 10^{-4}$ МэВ ⁻¹	$V_1^{SO} = 1.8722$ МэВ	$W_1^{SO} = 0.0038$ МэВ			
$V_2 = -0.0011$ МэВ ⁻¹	$W_2^D = 1.1955$ фм	$W_2^D = 0.5961$ МэВ	$V_2^{SO} = 0.3526$ МэВ ⁻¹	$W_2^{SO} = 0.4966$ МэВ ⁻¹			
$V_{HF} = 45.3526$ МэВ	$W_1^W = 0$ фм · МэВ ⁻¹	$r_0^D = 1.3894$ фм	$V_3^{SO} = 0.0483$ МэВ	$W_3^{SO} = 0.3488$ МэВ			
$\lambda = 0.0146$	$W_0^W = 0.7207$ фм	$r_1^D = 0$ фм · МэВ ⁻¹	$E_F^{VSO} = 13.5819$ МэВ	$E_F^{WSO} = 0$ МэВ			
$E_F = -13.615$ МэВ	$W_1^W = 0$ фм · МэВ ⁻¹	$a_0^D = 0.4261$ фм	$r_0^{VSO} = 1.0000$ фм	$r_0^{WSO} = 1.3765$ фм			
$E_C = 121.7326$ МэВ	$E_F^W = 0$ МэВ	$a_1^D = 0$ фм · МэВ ⁻¹	$r_1^{VSO} = -0.1595$ фм	$r_1^{WSO} = 0.0496$ фм			
$r_0 = 1.0838$ фм		$E_F^D = -2.2052$ МэВ	$r_2^{VSO} = 0.0318$ фм	$r_2^{WSO} = 0.0105$ фм			
$r_1 = 0.4021$ фм			$r_3^{VSO} = 1.8148$ фм · МэВ ⁻¹	$r_3^{WSO} = 0.1974$ фм · МэВ ⁻¹			
$r_2 = 0.0181$ фм · МэВ ⁻¹			$a_0^{VSO} = 0.5789$ фм	$a_0^{WSO} = 0.4997$ фм			
$r_3 = 0.1053$ фм · МэВ ⁻¹			$a_1^{VSO} = -0.1099$ фм	$a_1^{WSO} = -0.1513$ фм			
$a_0 = 0.5130$ фм			$a_2^{VSO} = 0.0102$ фм · МэВ ⁻¹	$a_2^{WSO} = 0.0403$ фм · МэВ ⁻¹			
$a_1 = 0.0467$ фм			$a_3^{VSO} = 0.3697$ фм · МэВ ⁻¹	$a_3^{WSO} = 0.1751$ фм · МэВ ⁻¹			
$a_2 = 0.0062$ фм МэВ ⁻¹							
$a_3 = 0.0995$ фм МэВ ⁻¹							

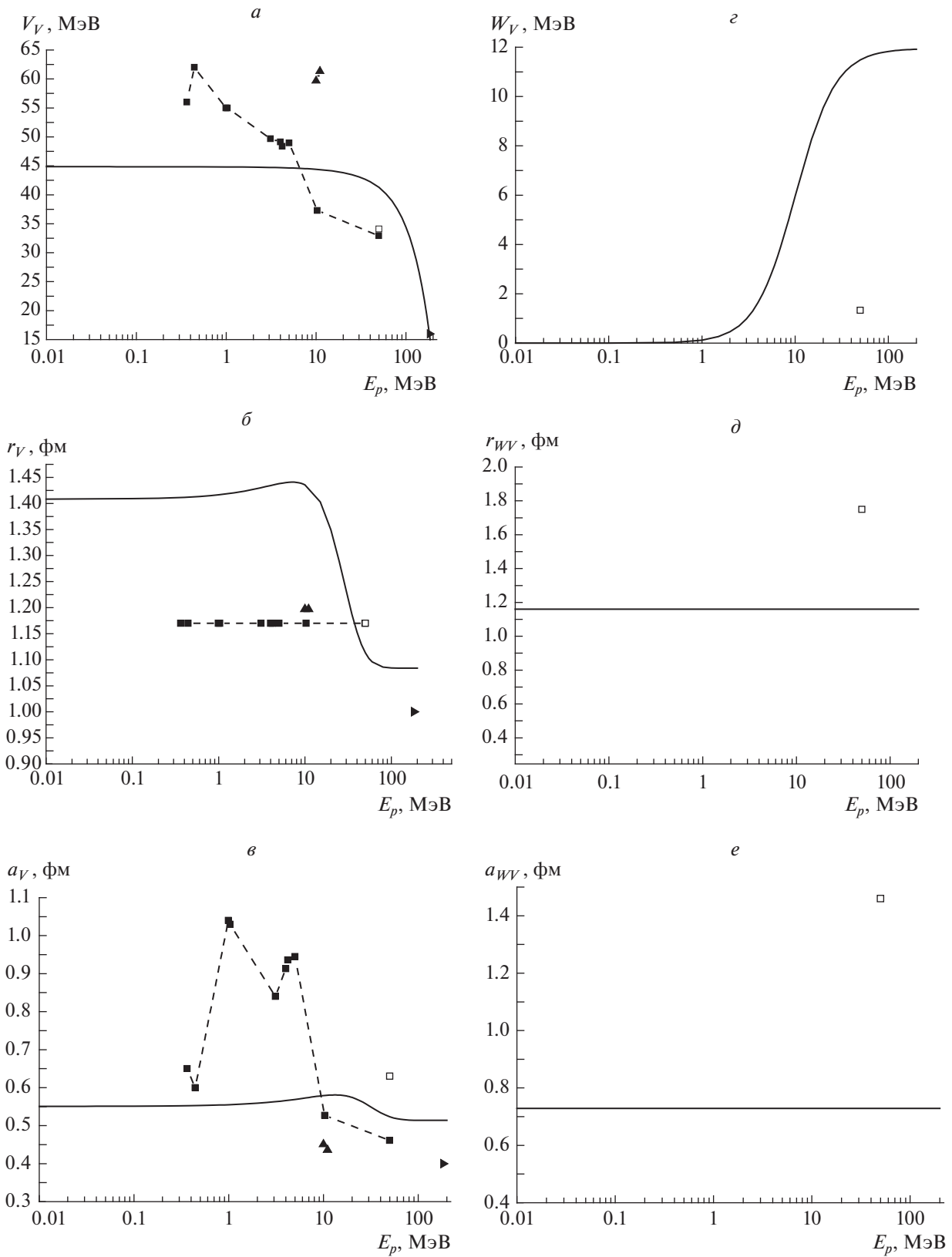


Рис. 5. Энергетическая зависимость параметров реального объемного потенциала: V_V (a), r_V (б), a_V (в), линия – настоящее описание, ▲ – [10], ■ – [16], □ – [19], ► – [20]. Энергетическая зависимость параметров потенциала объемного поглощения: W_V (г), r_{WV} (д), a_{WV} (е), линия – настоящее описание, □ – [19].

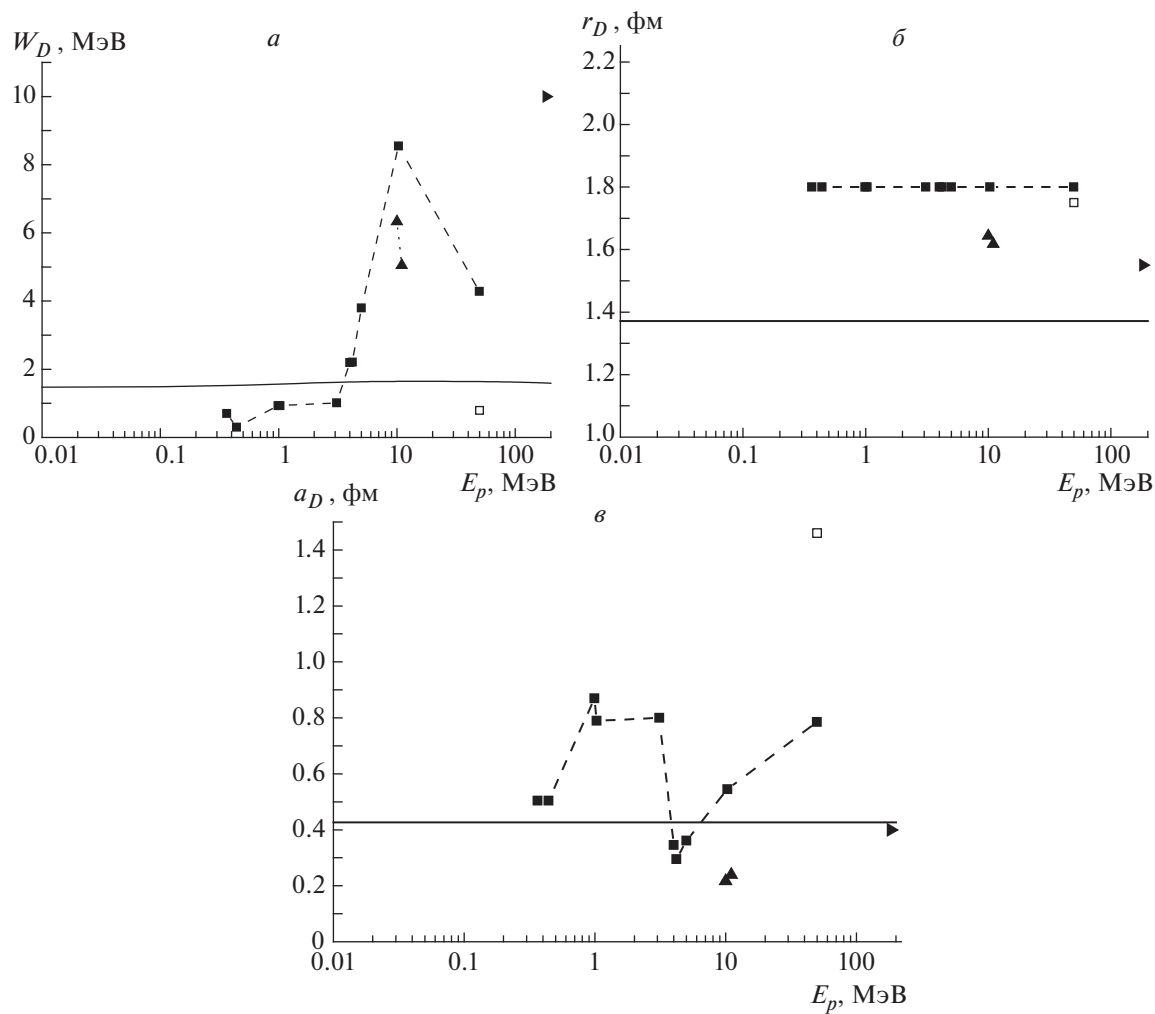


Рис. 6. Энергетическая зависимость параметров потенциала поверхностного поглощения: (а) W_D , (б) r_D , (в) a_D , обозначения те же, что на рис. 5.

Таблица 3. Значения параметров резонансов, полученные в настоящей работе и из литературы

E_R , МэВ	Γ_R , МэВ	$J\pi$	Ссылка	E_R , МэВ	Γ_R , МэВ	$J\pi$	Ссылка
0.3860	0.0198	1+	наст.	2.1681	0.6551	1–	наст.
0.3857	0.0107	1+	[27]	2.1457	0.645	1–	[27]
0.7527	0.1205	1–	наст.	2.145	0.640	1–	[28]
0.8944	0.1512	1–	наст.	2.3587	0.7020	4+	наст.
0.8957	0.138	1+	[27]	2.6057	0.7	4+	[27]
1.2283	0.9304	1+	наст.	2.9166	1.2299	2+	наст.
1.6300	0.1697	2–	наст.	2.8457	0.880	2+	[27]
1.6557	0.122	2–	[27]	3.9178	1.4100	4–	наст.
1.654	0.0485	2–	[28]	3.6457	1.6	4–	[27]
1.8327	0.2364	3+	наст.	4.2044	1.1373	3+	наст.
1.8147	0.271	3+	[27]	4.2457	1.1	3+	[27]
1.801	0.295	3+	[28]	4.9038	0.8962	2+	наст.
2.0755	0.3045	3+	наст.	4.9857	0.8	2+	[27]
1.9807	0.227	3+	[27]	4.9121	3.9497	1–	наст.
1.963	0.203	3+	[28]	6.5000	5.1391	1–	наст.
				6.7457	7	1–	[27]
				7.6680	6.8952	2+	наст.
				7.9457		2+	[27]

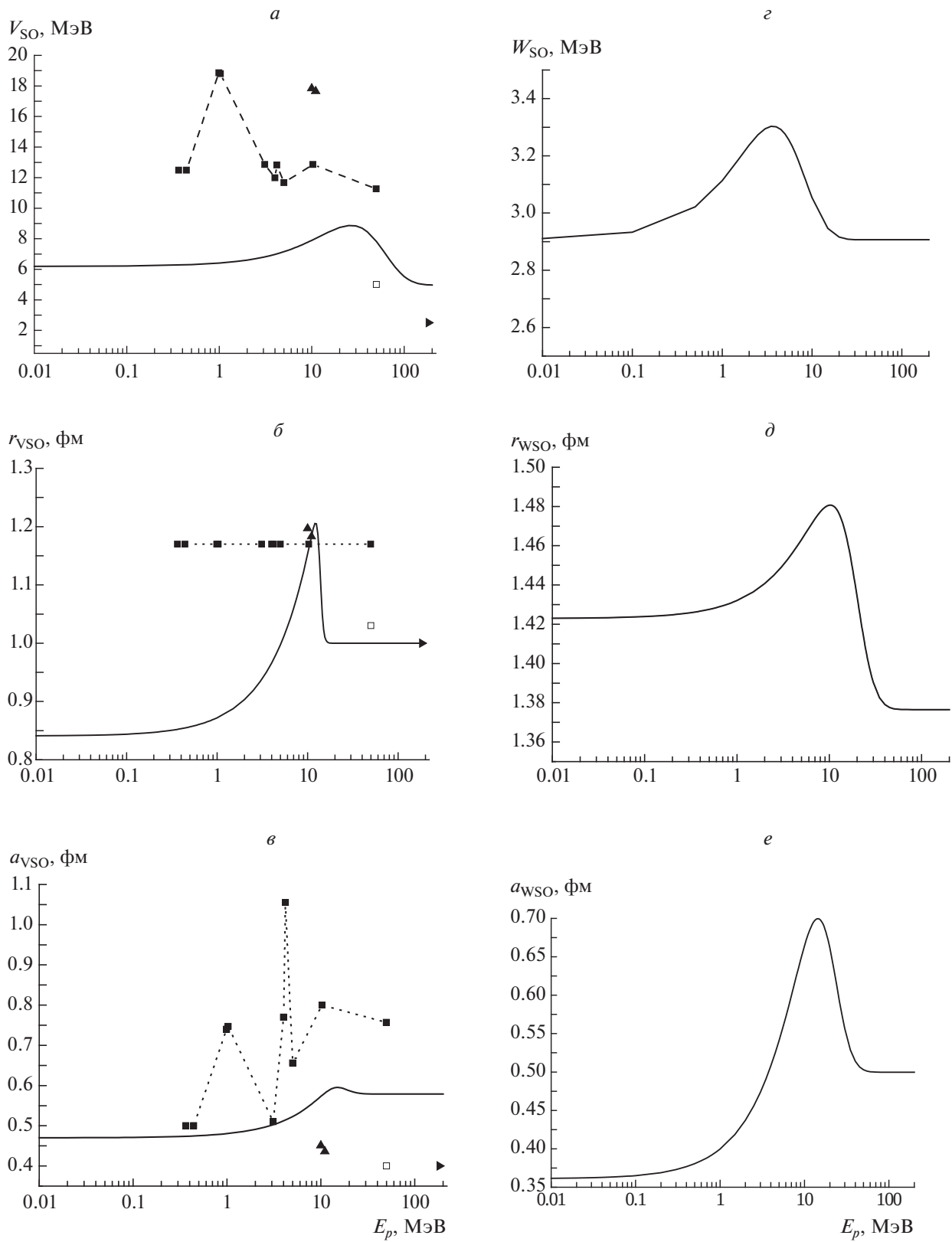


Рис. 7. Энергетическая зависимость параметров действительного спин-орбитального потенциала: (*a*) V_{SO} , (*б*) r_{VSO} , (*в*) a_{VSO} , обозначения те же, что на рис. 5. Энергетическая зависимость параметров потенциала спин-орбитального поглощения: (*з*) W_{SO} , (*д*) r_{WSO} , (*е*) a_{WSO} .

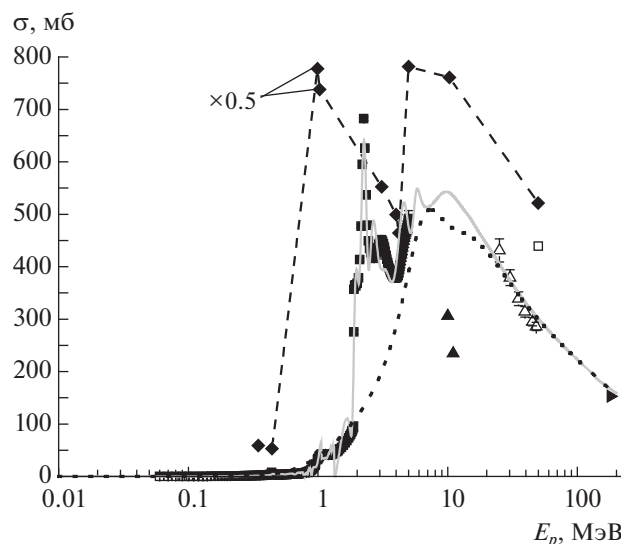


Рис. 8. Полные сечения реакции ${}^7\text{Li} + p$: полученные путем суммирования оцененных в нашей библиотеке SaBa [25] парциальных сечений реакций (p, γ) , (p, α_0) , (p, xn) , (p, t) , (p, p_1) , (■), экспериментальные данные [24] (Δ), рассчитанные нами по параметрам настоящей работы (сплошная линия — расчет по оптической модели с учетом резонансного вклада, короткий пунктир — расчет только по оптической модели) и по параметрам из литературы: $\blacktriangle$ — [10], $\blacklozenge$ — [16], $\square$ — [19], $\blacktriangleright$ — [20].

параметрам оптического потенциала, приведенным в ней. Видим, что литературные параметры в резонансной и пороговой областях энергии протонов плохо воспроизводят полные сечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен оптико-модельный анализ экспериментальных данных упругого рассеяния протонов на ядре ${}^7\text{Li}$ с учетом резонансного вклада. Обнаружено существенное изменение параметров оптического потенциала при переходе от рассеяния протонов на ядре ${}^6\text{Li}$ к рассеянию на ядре ${}^7\text{Li}$. Получена оценка полного сечения реакции ${}^7\text{Li} + p$ в интервале энергии налетающих протонов от 50 кэВ до 200 МэВ. Такие исследования выполнены впервые.

Работа будет продолжена с целью улучшения качества описания данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генералов Л.Н., Жеребцов В.А., Селянкина С.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. С. 1461; Generalov L.N., Zherebtsov V.A., Selyankina S.M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. P. 1136.
2. Генералов Л.Н., Жеребцов В.А., Таова С.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. С. 328; Generalov L.N., Zherebtsov V.A., Taova S.M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. P. 295.
3. Генералов Л.Н., Жеребцов В.А., Таова С.М. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2014. № 19. С. 164.
4. Warters W.D., Fowler W.A., Lauritsen C.C. // Phys. Rev. 1953. V. 91. P. 917.
5. Bingham H.G., Zander A.R., Kemper K.W. et al. // Nucl. Phys. A. 1971. V. 173. P. 265.
6. Kilian K., Clausnitzer G., Durr W. et al. // Nucl. Phys. A. 1969. V. 126. P. 529.
7. Bashkin S., Richards H.T. // Phys. Rev. 1951. V. 84. P. 1124.
8. Brown A.B., Csnyde W.R., Fowler W.A. // Phys. Rev. 1951. V. 82. P. 159.
9. Lerner G.M., Marion J.B. // Nucl. Instrum. Meth. 1969. V. 69. P. 115.
10. Gleyvod R., Heydenburg N.P., Naqib I.M. // Nucl. Phys. 1965. V. 63. P. 650.
11. Laurat M.R. // Report CEA-R-3727. 1969.
12. Glover C.W., Foster C.C., Schwandt P. et al. // Phys. Rev. C. 1991. V. 43. P. 1664.
13. Malmberg P.R. // Phys. Rev. 1956. V. 101. P. 114.
14. Rosen L., Leland W.T. // Phys. Rev. Lett. 1962. V. 8. P. 379.
15. Fasoli U., Toniolo D., Zago G. // Nuov. Cim. 1964. V. 34. P. 542.
16. Amar A., Hamada S., Burtbayev N. et al. // Int. J. Mod. Phys. 2011. V. 20. P. 980.
17. Андреев Г.Б., Дейнеко А.С., Малахов И.Я. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1965. Т. 29. С. 210.

18. Генералов Л.Н., Вихлянцева О.П., Карпов И.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. С. 1774; Generalov L.N., Vikhlyantsev O.P., Karpov I.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. P. 1511.
19. Mani G.S., Jacques D., Dix A.D.B. // Nucl. Phys. A. 1971. V. 165. P. 145.
20. Johansson A., Svanberg U., Hodgson P.E. // Arkiv Fys. 1961. V. 19. P. 541.
21. Caciolli A., Chiari M., Climent-Font A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. B. 2006. V. 249. P. 95.
22. Paneta V., Kafkarkou A., Kokkoris M. et al. // Nucl. Instrum. Meth. B. 2012. V. 288. P. 53.
23. Pakou A., Soukeras V., Cappuzzello F. et al. // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. Art. No. 014604.
24. Carlson R.F., Cox A.J. // Nucl. Phys. A. 1985. V. 445. P. 57.
25. Zvenigorodskij A.G., Zhrebtsov V.A., Lazarev L.M. et al. // IAEA-NDS-191. 1999.
26. Koori N., Kumabe I., Hyakutake M. et al. // Report JAERI-M 91-009. 1991.
27. Tilley D.R., Kelley J.H., Godwin J.L. et al. // Nucl. Phys. A. 2004. V. 745. P. 155.
28. Абрамович С.Н., Гужовский Б.Я., Лазарев Л.М. // ЭЧАЯ. 1992. Т. 23. С. 305.

Optical model analysis of proton elastic scattering on ^7Li nucleus with resonant part

L. N. Generalov^a, V. A. Zhrebtsov^a, S. M. Selyankina^a, *

^aRussian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, 607188 Russia

*e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Optical-model analysis of experimental data of proton elastic scattering on ^7Li nucleus at energy range from 0.05 to 200 MeV was performed. All existing experimental data on elastic scattering differential cross sections, polarization, $^7\text{Li} + p$ reaction total cross section were analyzed. Our optical model code OptModel with energy depending optical potential parameters and considering resonant part of the elastic scattering was used. Violation of scattering matrix unitarity (optical model + resonance) at several energy values is less than 18%.