

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕЙТРОННЫХ АНАЛИЗИРУЮЩИХ СПОСОБНОСТЕЙ Ay , Ayy И Axx В dp -УПРУГОМ РАССЕЯНИИ НА НУКЛОТРОНЕ

© 2023 г. В. П. Ладыгин^{1)*}, А. В. Аверьянов¹⁾, Е. В. Черных¹⁾, Д. Еначе²⁾, Ю. В. Гурчин¹⁾, А. Ю. Исупов¹⁾, М. Янек³⁾, Ю. Т. Карачук²⁾, А. Н. Хренов¹⁾, Д. О. Кривенков¹⁾, П. К. Курилкин¹⁾, Н. Б. Ладыгина¹⁾, А. Н. Ливанов¹⁾, С. М. Пиядин¹⁾, С. Г. Резников¹⁾, А. А. Терёхин¹⁾, А. В. Тишевский¹⁾, Т. Уесака^{1,4)}, И. С. Волков¹⁾

Поступила в редакцию 18.06.2023 г.; после доработки 18.06.2023 г.; принята к публикации 18.06.2023 г.

Представлены результаты векторной Ay и тензорных Ayy и Axx анализирующих способностей в упругом дейтрон-протонном рассеянии при больших поперечных импульсах. Эти данные были получены на внутренней мишени Нуклотрона ОИЯИ в диапазоне энергий 400–1800 МэВ с использованием пучка поляризованных дейтронов от нового источника поляризованных ионов. Новые данные по дейтронным анализирующим способностям в широком энергетическом диапазоне демонстрируют чувствительность спиновой структуры изоскалярных нуклон-нуклонных корреляций на малых расстояниях.

DOI: 10.31857/S0044002723060089, EDN: OVJLEY

1. ВВЕДЕНИЕ

Основная цель экспериментальной программы коллаборации DSS — получение информации о спин-зависимых частях двух- и трехнуклонных корреляций в двух процессах: дейтрон-протонном упругом рассеянии в широком интервале энергий и безмезонном развале дейтрона с детектированием двух протонов при энергиях 300–500 МэВ [1–3] на станции внутренних мишеней (СВМ) [4].

Важность исследований dp -упругого рассеяния при высоких энергиях обсуждается в работе [5]. Экспериментальная программа на Нуклотроне была начата измерениями векторной Ay и тензорных Ayy и Axx анализирующих способностей в dp -упругом рассеянии при энергиях $Td = 880$ [6] и 2000 МэВ [7]. Также в последние годы были выполнены систематические измерения дифференциального сечения [8–10].

В настоящей работе представлены новые результаты по векторной Ay и тензорным Ayy и Axx анализирующим способностям в dp -упругом рассеянии, полученным на СВМ Нуклотрона [4] в энергетическом диапазоне 400–1800 МэВ.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка СВМ хорошо подходит для исследования энергетической зависимости поляризационных наблюдаемых для упругого дейтрон-протонного рассеяния и реакции развала дейтрона с детектированием двух протонов при больших углах рассеяния. Для этих целей для измерений используется CH_2 -мишень толщиной 10 мкм. Выход от содержания углерода в CH_2 -мишени оценивается в отдельных измерениях с использованием нескольких скрученных 8 мкм углеродных нитей. Контроль интенсивности осуществляется детектированием pp -квазиупругого рассеяния под углом 90° в с.ц.м. сцинтилляционными счетчиками, расположенными в горизонтальной плоскости. Детектирование dp -упругих событий осуществляется методом совпадений сигналов со сцинтилляционных детекторов для вторичных протонов и дейтронов. Детекторы расположены как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях для измерения анализирующих способностей. Отбор dp -упругих событий осуществляется методом корреляции потерь энергии в пластиковых сцинтилляторах для дейтрона и протона и их разности во времени полета. Использование большого количества сцинтилляционных счетчиков позволило покрыть широкий угловой диапазон [11]. Данный метод был использован для получения поляризационных данных в dp -упругом рассеянии при энергии 880 [6] и 2000 МэВ [7].

Модернизированная установка на СВМ [4] была использована для измерения векторной Ay и тензорных Ayy и Axx анализирующих способностей в

¹⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

²⁾Национальный институт исследования и развития электротехники, Бухарест, Румыния.

³⁾Жилинский университет, Физическое отделение, Жилина, Словакия.

⁴⁾Нишина Научный центр, РИКЕН, Вако, Япония.

*E-mail: vladygin@jinr.ru

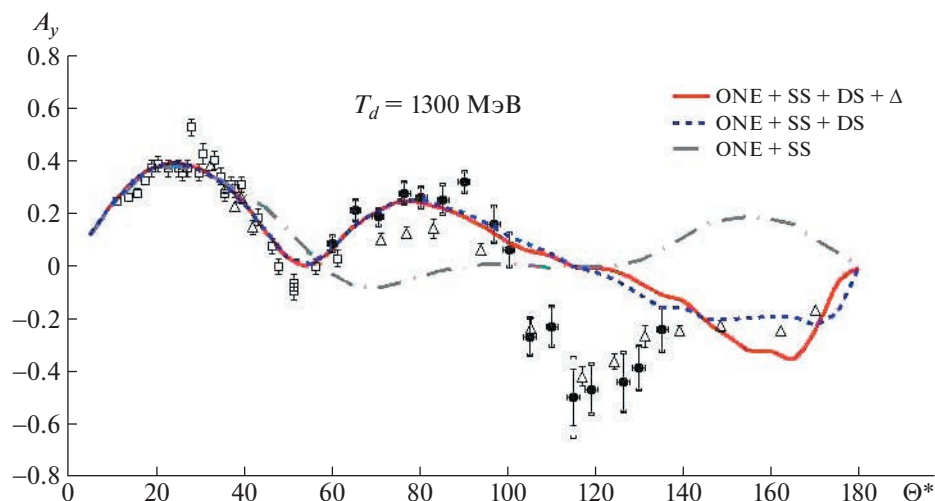


Рис. 1. Векторная анализирующая способность A_y при энергии 1300 МэВ. Закрашенные квадраты — данные, полученные на Нуклотроне. Открытые квадраты, треугольники и кружки — данные, полученные в США [14] и Франции [15] соответственно. Кривые — теоретические расчеты, выполненные в формализме релятивистского многократного рассеяния [16–19].

dp -упругом рассеянии при энергиях между 400 и 1800 МэВ с использованием пучка поляризованных дейтронов, полученного из созданного в ЛФВЭ ОИЯИ нового источника поляризованных ионов [12]. Данные измерения проводились с использованием СВМ на Нуклотроне [4] с новой системой управления и сбора данных [13]. Существующая установка [11] была модернизирована путем введения в эксплуатацию новой системы сбора данных на базе VME стандарта, новой системы высоковольтного питания MPod, новыми мониторными детекторами и т.д. Эта же установка была использована и в качестве поляриметра, основанного на использовании dp -упругого рассеяния на большие углы при энергии 270 МэВ [11]. Точность определения векторной и тензорной компонент поляризации дейтронного пучка составляет 2%.

3. ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Пучок поляризованных дейтронов обеспечивался новым источником поляризованных ионов [12]. В эксперименте были использованы спиновые моды с максимальными идеальными значениями $(P_z, P_{zz}) = (0, 0)$, $(+1/3, +1)$ и $(+1/3, +1)$. Поляризация пучка дейтронов была измерена при энергии 270 МэВ [11]. События для dp -упругого рассеяния отбирались с использованием корреляции потерь энергии и разности времени полета для дейтронных и протонных детекторов. Значения поляризации пучка для различных спиновых мод источника [12] были получены в виде средневзвешенных значений для восьми углов рассеяния для dp -упругого рассеяния. Типичные

значения поляризации пучка составили 65–75% от идеальных значений.

После измерения поляризации пучка дейтронов при энергии 270 МэВ пучок был ускорен до требуемой энергии между 400 и 1800 МэВ. Сцинтилляционные детекторы располагались в горизонтальной и вертикальной плоскостях в соответствии с кинематикой dp -упругого рассеяния для исследуемой энергии. Основная часть измерений была выполнена с использованием CH_2 -мишени. Углеродная мишень использовалась для оценки фона. Отбор dp -упругих событий осуществлялся по корреляции потерь энергии в пластиковых сцинтилляторах для дейтрона и протона и их разницы по времени полета. Нормированные числа событий dp -упругого рассеяния для каждой спиновой моды были использованы для вычисления значений анализирующих способностей A_y , A_{yy} и A_{xx} .

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные данные по угловым зависимостям векторной A_y , тензорных A_{yy} и A_{xx} анализирующих способностей дейтрона в реакции дейтрон-протонного упругого рассеяния были получены при нескольких энергиях от 400 до 1800 МэВ кинетической энергии налетающего дейтрона. Угловые зависимости векторной A_y , тензорных A_{yy} и A_{xx} анализирующих способностей дейтрона при кинетической энергии $T_d = 1300$ МэВ представлены на рис. 1, 2 и 3 соответственно. Закрашенные кружки — результаты эксперимента DSS на Нуклотроне. Открытые квадраты и треугольники — данные, полученные в США [14] и Франции [15] соответственно.

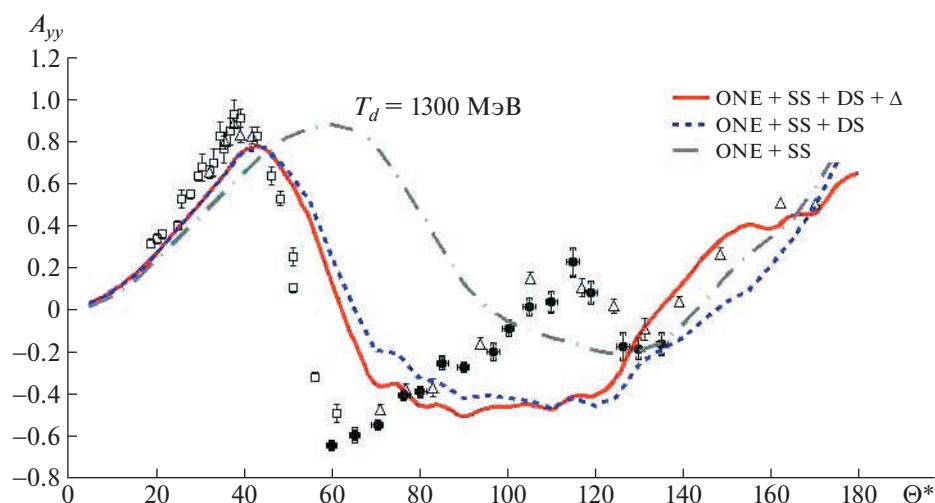


Рис. 2. Тензорная анализирующая способность A_{yy} при энергии 1300 МэВ. Закрашенные квадраты — данные, полученные на Нуклотроне. Открытые квадраты, треугольники и кружки — данные, полученные в США [14] и Франции [15] соответственно. Кривые — теоретические расчеты, выполненные в формализме релятивистского многократного рассеяния [16–19].

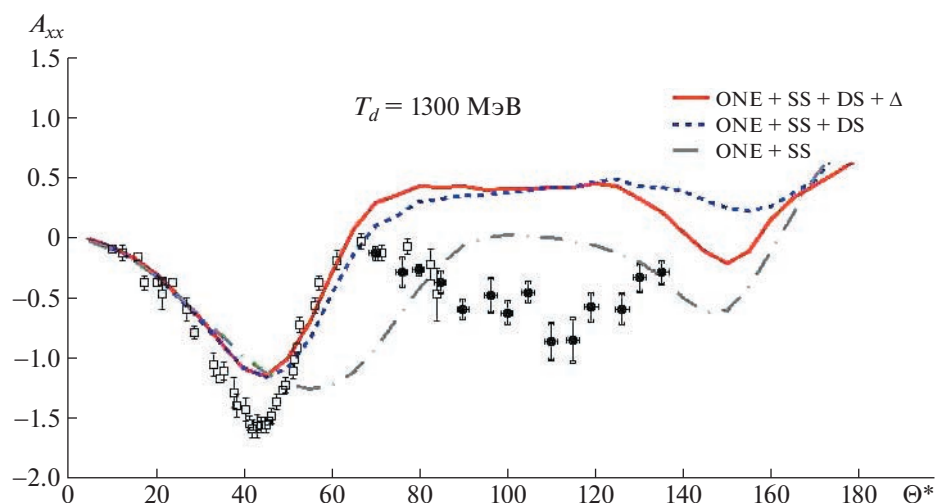


Рис. 3. Тензорная анализирующая способность A_{xx} при энергии 1300 МэВ. Закрашенные квадраты — данные, полученные на Нуклотроне. Открытые квадраты, треугольники и кружки — данные, полученные в США [14]. Кривые — теоретические расчеты, выполненные в формализме релятивистского многократного рассеяния [16–19].

Можно видеть хорошее совпадение новых данных, полученных на Нуклотроне, с данными более ранних экспериментов [14, 15]. Теоретические расчеты проводились в формализме релятивистского многократного рассеяния [16–19] с учетом четырех вкладов: однонуклонного обмена (ONE), однократного и двукратного рассеяния (SS и DS) и возбуждения дельта-изобары в промежуточном состоянии. Представленный подход был успешно применен для описания дифференциальных сечений при энергиях дейтронов до 1800 МэВ [8–10] во всем угловом диапазоне [18], а также анализирующих способностей [19]. Штриховая и сплошная линии — результаты расчетов, выполненные

в рамках релятивистской модели многократного рассеяния [16, 17] с учетом только однонуклонного обмена и однократного рассеяния (ONE + SS) и с дополнительным вкладом двукратного рассеяния (ONE + SS + DS). Вклад механизма с возбуждением дельта-изобары существенен только при углах больше 140° в с.ц.м. [18, 19]. Релятивистская модель многократного рассеяния [16, 17] неплохо описывает данные по A_y и A_{yy} за исключением области углов от 100° до 140° в с.ц.м., где наблюдается аномалия в поведении этих двух наблюдаемых. Векторная анализирующая способность A_y достигает значения около -0.4 , в то время

как тензорная анализирующая способность A_{yy} стремится к нулю. Модель также не описывает поведение тензорной анализирующей способности A_{xx} при углах больше 70° в с.ц.м. [18, 19]. Возможно, рассмотрение вклада трехнуклонных сил с их короткодействующей частью позволит улучшить согласие.

Энергетические зависимости векторной A_y и тензорной A_{yy} анализирующих способностей при фиксированных углах рассеяния в с.ц.м. показывают сильную зависимость от поперечного импульса P_T . Результаты, полученные в ходе данного эксперимента, неплохо совпадают с ранее полученными результатами на Нуклотроне [6, 7], во Франции, США и Японии [14, 15, 20–25]. Как A_y , так и A_{yy} анализирующие способности меняют знак при P_T около 600 МэВ/с и имеют тенденцию при больших поперечных импульсах достигать положительных и отрицательных постоянных значений соответственно. Эти особенности данных свидетельствуют о серьезном отклонении спиновой структуры двухнуклонных короткодействующих корреляций от стандартного описания нуклон-нуклонного взаимодействия. Требуется дальнейшие теоретические исследования, чтобы понять поведение полученных данных при больших P_T .

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизированный Нуклотрон с новым источником поляризованных ионов [12] дает уникальную возможность для изучения спиновых эффектов и поляризационных явлений в малонуклонных системах. Реализация программы эксперимента DSS на СВМ Нуклотрона позволяет получить важнейшие данные о спиновой структуре двухнуклонных и трехнуклонных короткодействующих корреляций.

Проведено сканирование угловых зависимостей дейтронных анализирующих способностей в dp -упругом рассеянии по начальной энергии от 400 до 1800 МэВ. Полученные данные демонстрируют чувствительность к спиновой структуре дейтрона на малых межунонных расстояниях и возможно-му проявлению возбуждения резонансов.

Авторы благодарны коллективу Нуклотрона за хорошие условия проведения эксперимента. Они признательны А.С. Белову, В.Б. Шутову, В.В. Фимушкину за настройку источника поляризованных дейтронов. Авторы благодарят С.Н. Базылева, В.И. Максименкову, И.В. Слепнева, В.М. Слепнева, А.В. Шутова и Я.Т. Схоменко за помощь во время подготовки и проведения эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. P. Ladygin, T. Uesaka, V. V. Glagolev, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, K. Itoh, M. Janek, J.-T. Karachuk, T. Kawabata, A. N. Khrenov, A. S. Kiselev, V. A. Krasnov, A. B. Kurepin, A. K. Kurilkin, P. K. Kurilkin, N. B. Ladygina, *et al.*, *Phys. Part. Nucl.* **45**, 327 (2014).
2. V. P. Ladygin, Yu. V. Gurchin, S. M. Piyadin, A. A. Terekhin, A. Yu. Isupov, M. Janek, J.-T. Karachuk, A. N. Khrenov, V. A. Krasnov, A. K. Kurilkin, P. K. Kurilkin, N. B. Ladygina, A. N. Livanov, G. Martinska, V. L. Rapatsky, S. G. Reznikov, *et al.*, *Few Body Syst.* **55**, 709 (2014).
3. M. Janek, V. P. Ladygin, S. M. Piyadin, P. N. Batyuk, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, Julia-Tatiana Karachuk, A. K. Kurilkin, P. K. Kurilkin, A. N. Livanov, G. Martinska, S. P. Merts, S. G. Reznikov, G. Tarjanyiova, A. A. Terekhin, and I. E. Vnukov, *Few Body Syst.* **58**, 40 (2017).
4. A. I. Malakhov, S. V. Afanasiev, Yu. S. Anisimov, A. S. Artiomov, S. N. Bazilev, A. N. Khrenov, J. Kliman, V. A. Krasnov, V. Matoušek, M. Morháč, A. Yu. Starikov, A. V. Shabunov, V. M. Slepnev, and I. Turzo, *Nucl. Instrum. Methods A* **440**, 320 (2000).
5. V. P. Ladygin, I. Dobrin, V. V. Fimushkin, D. A. Finogenov, S. G. Genchev, Yu. V. Gurchin, A. P. Ierusalimov, A. Yu. Isupov, K. Itoh, M. Janek, E. V. Karpechev, J.-T. Karachuk, S. V. Khabarov, T. Kawabata, A. N. Khrenov, V. A. Krasnov, *et al.*, *Int. J. Mod. Phys.: Conf. Ser.* **40**, 1660074 (2016).
6. P. K. Kurilkin *et al.* (DSS Collab.), *Phys. Lett. B* **715**, 61 (2012).
7. P. K. Kurilkin, V. P. Ladygin, T. Uesaka, K. Suda, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, K. Itoh, M. Janek, J.-T. Karachuk, T. Kawabata, A. N. Khrenov, A. S. Kiselev, V. A. Kizka, V. A. Krasnov, N. B. Ladygina, A. N. Livanov, *et al.*, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **8**, 1081 (2011).
8. A. A. Terekhin *et al.* (DSS Collab.), *Phys. Part. Nucl. Lett.* **12**, 695 (2015).
9. A. A. Terekhin, V. P. Ladygin, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, A. K. Kurilkin, P. K. Kurilkin, N. B. Ladygina, S. M. Piyadin, S. G. Reznikov, and A. N. Khrenov, *Phys. At. Nucl.* **80**, 1061 (2017).
10. A. A. Terekhin, V. P. Ladygin, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, M. Janek, A. N. Khrenov, A. K. Kurilkin, P. K. Kurilkin, N. B. Ladygina, S. M. Piyadin, and S. G. Reznikov, *Eur. Phys. J. A* **55**, 129 (2019).
11. P. K. Kurilkin, V. P. Ladygin, T. Uesaka, K. Suda, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, K. Itoh, M. Janek, J.-T. Karachuk, T. Kawabata, A. N. Khrenov, A. S. Kiselev, V. A. Kizka, J. Kliman, V. A. Krasnov, A. N. Livanov, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **642**, 45 (2011).
12. V. V. Fimushkin, A. D. Kovalenko, L. V. Kutuzova, Yu. V. Prokofichev, B. Shutov, A. S. Belov, V. N. Zubets, and A. V. Turbabin, *J. Phys.: Conf. Ser.* **678**, 012058 (2016).

13. A. Yu. Isupov, V. A. Krasnov, V. P. Ladygin, S. M. Piyadin, and S. G. Reznikov, Nucl. Instrum. Methods A **698**, 127 (2013).
14. M. Haji-Saied, E. Bleszynski, M. Bleszynski, J. Carroll, G. J. Igo, T. Jaroszewicz, A. T. Wang, A. Sagle, J. B. McClelland, C. L. Morris, R. Klem, T. Joyce, Y. Makdishi, M. Marshak, B. Mossberg, E. A. Peterson, K. Ruddick, *et al.*, Phys. Rev. C **36**, 2010 (1987).
15. J. Arvieux, S. D. Baker, R. Beurtey, M. Boivin, J. M. Cameron, T. Hasegawa, D. Hutcheon, J. Banaigs, J. Berger, A. Codino, J. Duflo, L. Goldzahl, F. Plouin, A. Boudard, G. Gaillard, N. Van Sen, *et al.*, Nucl. Phys. A **431**, 613 (1984).
16. N. B. Ladygina, Phys. At. Nucl. **71**, 2039 (2008).
17. N. B. Ladygina, Eur. Phys. J. A **42**, 91 (2009).
18. N. B. Ladygina, Eur. Phys. J. A **52**, 199 (2016).
19. N. B. Ladygina, Eur. Phys. J. A **56**, 133 (2020).
20. K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Witała, W. Glöckle, J. Golak, M. Hatano, H. Kamada, H. Kato, Y. Maeda, J. Nishikawa, A. Nogga, T. Ohnishi, H. Okamura, N. Sakamoto, S. Sakoda, Y. Satou, *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 034003 (2002).
21. K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Witała, K. Ermisch, W. Glöckle, J. Golak, M. Hatano, H. Kamada, N. Kalantar-Nayestanaki, H. Kato, Y. Maeda, J. Nishikawa, A. Nogga, T. Ohnishi, H. Okamura, T. Saito, *et al.*, Phys. Rev. C **70**, 014001 (2004).
22. R. V. Cadman, J. Brack, W. J. Cummings, J. A. Fedchak, B. D. Fox, H. Gao, W. Glöckle, J. Golak, C. Grosshauser, R. J. Holt, C. E. Jones, H. Kamada, E. R. Kinney, M. A. Miller, W. Nagengast, A. Nogga, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 967 (2001).
23. B. von Przewoski, H. O. Meyer, J. T. Balewski, W. W. Daehnick, J. Doskow, W. Haeblerli, R. Ibald, B. Lorentz, R. E. Pollock, P. V. Pancella, F. Rathmann, T. Rinckel, S. K. Saha, B. Schwartz, P. Thorngren-Engblom, *et al.*, Phys. Rev. C **74**, 064003 (2006).
24. M. Garcon, B. Bonin, G. Bruge, J. C. Duchazeaubeneix, M. Rouger, J. Saudinos, B. H. Silverman, D. M. Sheppard, J. M. Cameron, W. J. McDonald, G. C. Neilson, W. C. Olsen, and K. R. Starko, Nucl. Phys. A **458**, 287 (1986).
25. V. Ghazikhanian, B. Aas, D. Adams, E. Bleszynski, M. Bleszynski, J. Bystricky, G. J. Igo, T. Jaroszewicz, F. Sperisen, C. A. Whitten, Jr., P. Chaumette, J. Deregél, J. Fabre, F. Lehar, A. de Lesquen, L. van Rossum, *et al.*, Phys. Rev. C **43**, 1532 (1991).

MEASUREMENT OF THE DEUTERON ANALYZING POWERS A_y , A_{yy} AND A_{xx} IN dp -ELASTIC SCATTERING AT NUCLOTRON

V. P. Ladygin¹⁾, A. V. Averyanov¹⁾, E. V. Chernykh¹⁾, D. Enache²⁾, Yu. V. Gurchin¹⁾,
A. Yu. Isupov¹⁾, M. Janek³⁾, J. T. Karachuk²⁾, A. N. Khrenov¹⁾, D. O. Krivenkov¹⁾,
P. K. Kurilkin¹⁾, N. B. Ladygina¹⁾, A. N. Livanov¹⁾, S. M. Piyadin¹⁾, S. G. Reznikov¹⁾,
A. A. Terekhin¹⁾, A. V. Tishevsky¹⁾, T. Uesaka⁴⁾, I. S. Volkov¹⁾

¹⁾Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²⁾National Institute for R&D in Electrical Engineering ICPE-CA, 030138, Bucharest, Romania

³⁾Physics Department, University of Zilina, 010 26, Žilina, Slovakia

⁴⁾Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN, Wako, Japan

The results on the vector A_y and tensor A_{yy} and A_{xx} analyzing powers in deuteron–proton elastic scattering at large scattering angles are presented. These data were obtained at internal target at JINR Nuclotron in the energy range 400–1800 MeV using polarized deuteron beam from new polarized ion source. New data on the deuteron analyzing powers in the wide energy range demonstrate the sensitivity to the short-range spin structure of the isoscalar nucleon–nucleon correlations.