











МРНТИ 29.15.19

<https://doi.org/10.26577/RCPH97220264>

С.К. Сахиев¹ , Маулен Насурлла¹ , Н. Буртебаев¹ , Н.О. Садуев^{1,2} ,
 Д.А. Исаев^{1,2*} , Маржан Насурлла¹ , Р.А. Ходжаев^{1,2} , К.А. Талпакова¹ ,
 А.К. Нұрпейсов^{1,2} , С.А. Турганова¹ 

¹Институт ядерной физики АРКАЭ, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: damir.isaev.15@gmail.com

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ ¹³C

Измерены дифференциальные сечения неупругого рассеяния дейтронов на ядре ¹³C для энергии 14.5 и 18 МэВ для следующих возбужденных состояний: 3.09 МэВ (1/2⁺), 3.68 МэВ (3/2⁻) и 6.86 МэВ (5/2⁺). Экспериментальные данные были получены с высоким угловым разрешением в широком диапазоне углов, 10°÷110° в системе центра масс, что позволило детально исследовать структуру угловых распределений. Был произведен анализ угловых распределений упругого рассеяния дейтронов на ядрах ¹³C. Модель двойной свертки показала себя лучшей только при больших переданных импульсах. Выполнен сравнение описания упругого рассеяния между оптической моделью ядра и моделью двойной свертки. Получена систематика параметров оптического потенциала (ОП) для реакции ¹³C(d,d)¹³C в энергетическом диапазоне E_d=13÷18 МэВ с помощью минимизации χ². Полученные параметры были использованы в рамках метода связанных каналов (МСК) для анализа угловых распределений упругого и неупругого рассеяния дейтронов на ядрах ¹³C. За счет анализа неупругого рассеяния дейтронов были вычислены параметры деформации низколежащих возбужденных состояний ядра ¹³C согласующиеся с литературными данными.

Ключевые слова: ядро ¹³C, дейтроны, оптическая модель, коллективная модель, метод связанных каналов, параметры деформации.

С.К. Сахиев¹, Маулен Насурлла¹, Н. Буртебаев¹, Н. О. Садуев^{1,2},
 Д.А. Исаев^{1,2*}, Маржан Насурлла¹, Р.А. Ходжаев^{1,2}, Қ.А. Талпақова¹,
 А.Қ. Нұрпейсов^{1,2}, С.А. Турганова¹

¹Ядролық физика институты ҚР АЭА, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: damir.isaev.15@gmail.com

Дейтрондардың ¹³C ядроларында әрекеттесуін зерттеу

Келесі қозған күйлер үшін 14.5 және 18 МэВ энергиясы үшін ¹³C ядроларында дейтрондардың серпімді емес шашырауының дифференциалдық қималары өлшенді: 3.09 МэВ (1/2⁺), 3.68 МэВ (3/2⁻) және 6.86 МэВ (5/2⁺). Эксперименттік деректер бұрыштардың кең диапазонында, массалар центрі жүйесіндегі 10°÷110°, жоғары бұрыштық ажыратылымдықпен алынды, бұл бұрыштық үлестірімдердің құрылымын егжей-тегжейлі зерттеуге мүмкіндік берді. ¹³C ядроларындағы дейтрондардың серпімді шашырауының бұрыштық таралуына талдау жасалды. Ядроның оптикалық моделі мен екі реттік фолдинг моделі арасындағы серпімді шашырауының сипаттамасын салыстыру жүргізілді. Екі реттік фолдинг моделі тек үлкен берілген импульстарда өзін жақсы көрсетті. ¹³C(d,d)¹³C реакциясы үшін оптикалық потенциал (ОП) параметрлерінің систематикасы E_d=13÷18 МэВ энергия жипазонында, χ²-ті минимизациялау арқылы табылды. Табылған параметрлер ¹³C ядроларындағы серпімді емес дейтрон шашырауының бұрыштық таралуын талдау үшін байланысқан арналар әдісі (БАӘ) аясында қолданылды. Серпімді емес

дейтрон шашырауының талдау арқылы, әдеби деректерге сәйкес келетін, ^{13}C ядросының төмен жатқан қозған күйлерінің деформация параметрлері есептелді.

Түйін сөздер: ^{13}C ядросы, дейтрондар, оптикалық модель, коллективтік модель, байланысқан арналар әдісі, деформация параметрлері.

S.K. Sakhiyev¹, Maulen Nassurlla¹, N. Burtebayev¹, N.O. Saduyev^{1,2},
D.A. Issayev^{1,2*}, Marzhan Nassurlla¹, R.A. Khodjayev^{1,2}, K.A. Talpakova¹,
A.K. Nurpeisov^{1,2}, S.A. Turganova¹

¹Institute of Nuclear Physics ARKAE, Almaty, Kazakhstan

²Farabi University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: damir.isaev.15@gmail.com

Investigation of deuteron interaction with ^{13}C nuclei

The differential cross sections of inelastic deuteron scattering on the ^{13}C nuclei were measured at energies 14.5 and 18 MeV for the following excited states: 3.09 MeV ($1/2^+$), 3.68 MeV ($3/2^-$) and 6.86 MeV ($5/2^+$). Experimental data were obtained with high angular resolution in a wide range of angles from 10° to 110° in the center of mass system, which made it possible to study in detail the structure of angular distributions. The angular distributions of elastic scattering of deuterons on ^{13}C nuclei were analyzed. A comparison of the description of elastic scattering between the optical model of the nucleus and the double folding model was performed. The double folding method proved to be best only for large transmitted momentums. A systematics of the optical potential (OP) parameters for the $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}$ in the energy range $E_d=13\div 18$ MeV was obtained by minimizing χ^2 . The obtained parameters were used within the framework of the coupled channel method (CC) to analyze the angular distributions of elastic and inelastic scattering of deuterons on ^{13}C nuclei. Due to analysis of inelastic deuteron scattering, the deformation parameters of low-lying excited states of the ^{13}C nucleus were calculated, consistent with literature data.

Keywords: ^{13}C nucleus, deuterons, optical model, collective model, coupled channel calculations, deformation parameters.

Введение

С середины прошлого столетия рассеяние частиц было одним из стандартных методов для исследования структуры ядра-мишени. В процессах рассеяния, после взаимодействия внутренние структуры и энергии как снаряда, так и мишени не претерпевают каких-либо изменений. Такие процессы обычно называют упругим рассеянием. Упругое рассеяние легких ядер таких как — протоны, дейтроны, ^3He и альфа-частицы является мощным инструментом для изучения спектроскопии и структуры ядер. За счет слабой энергии связи и что следует с этого, отсутствия спектроскопии этих легких частиц делают их незаменимыми в этой цели. Дейтроны, в отличие от альфа-частиц, имеют слабосвязанную структуру [1] с энергией связи около 2 МэВ [2]. Тем самым, дейтрон приходится одним из ключевых ядер для исследования одно-нуклонных передач на ряду с ядром ^3He .

Структура ядра ^{13}C всегда была интересна по двум причинам: валентный нейтрон который

заполняет $1p_{1/2}$ оболочку и сложная структура низколежащих уровней [3]. ^{13}C является хорошим примером ядра описываемым оболочечной моделью ядра. Возбужденные состояния ^{13}C вплоть до ~ 10 МэВ хорошо изучено [4]. После обнаружения кластерной структуры в виде 3α конфигурации второго возбужденного состояния ядра ^{12}C (7.65 МэВ, 0^+) Фредом Хойлем в 1954 году исследователи ищут аналоги таких возбужденных состояний в других ядрах с явно выраженной кластерной структурой. В работах [5, 6] предполагается существование аналога состояния Хойля в уровне ^{13}C 8.86 МэВ ($1/2^-$) с кластерной структурой в виде $^{12}\text{C}+n$. Также присутствует изучение зеркального ядра ^{13}N на аналоги состояния Хойля [7, 8]. Гало состояние ядра отождествляется тем, что валентный нуклон явно находящийся на высшей орбите образует с оставшимся ядром-оставом связь, тем самым увеличивая радиус ядра и сечения взаимодействия с этим ядром. Первое возбужденной

состояние исследуемого ядра 3.09 МэВ ($1/2^-$) считается гало состоянием с типичной для таких ядер структурой [9-11].

Взаимодействие дейтронов с ядром ^{13}C ранее изучалась для разных целей. В работах [12, 13] были произведены эксперименты по измерению сечений взаимодействия и анализирующие способности дейтрона с ^{13}C при низких энергиях. Эксперименты специально проводились на суббарьерных энергиях для исключения содержания волновой функции дейтрона в поле ядерного потенциала мишени. Эти исследования показали, что в энергетическом диапазоне ниже 1 МэВ взаимодействие $^{13}\text{C}+d$ не имеет резонансную структуру, то есть реакции являются прямыми. Механизмы реакции, вызываемые бомбардировкой дейтронов и структура ядра ^{13}C были исследованы в работах [14-17]. В настоящем исследовании были использованы данные из работ [14-17], то есть в энергетическом диапазоне $E_d=13.7\div 18$ МэВ.

Экспериментальные данные по энергиям выше кулоновского барьера были проанализированы с помощью оптической модели [18], и были сравнены разные наборы потенциалов. Хорошие параметры оптического потенциала обеспечивают точные предсказания реакции возбуждения, перезарядки и передач нуклонов. Информация по параметрам оптической модели помогают при вычислениях в рамках методов связанных каналов (МСК) и искаженных волн (МИВ). За счет сложности подбора параметров оптического потенциала, для одного эксперимента существуют глобализация потенциала

оптической модели. В работе [19] построили глобальный оптический потенциал для дейтрона в энергетическом диапазоне $12\div 90$ МэВ. Хотя и в работе указано, что диапазон масс мишеней не меньше 27, в данной работе данная систематика была использована. Глобальный потенциал для ядер 1р-оболочки с более широким диапазоном энергии был систематизирован в работе [20]. В этой работе было показано особое поведение ядер при взаимодействии с дейтроном. Автор также указывает на более хорошее согласование угловых распределений дифференциальных сечений с экспериментом в отличие от предыдущей работы [19]. Оказалось, систематика из [19] лучше описывает энергетическое распределение полного сечения для ядер 1р-оболочки чем систематика, предложенная в [20].

Глобальные оптические потенциалы и локальные, полученные авторами этой работы, использовались для описания дифференциальных поперечных сечений (ДПС) упругого рассеяния дейтрона на ядре ^{13}C при энергиях $E_d=13.7\div 18$ МэВ. К тому же, параметры перечисленных оптических потенциалов были опробованы на неупругом рассеянии.

Вовлеченные экспериментальные данные возбуждения ядра ^{13}C в анализе, в частности, 3.09 МэВ ($1/2^+$), 3.684 МэВ ($3/2^-$) и 6.86 МэВ ($5/2^+$), были измерены при энергиях 14.5 и 18 МэВ на изохронном циклотроне У-150М при Институте Ядерной Физики АРКАЭ. Ознакомиться с экспериментальной установкой и методами можно по работам [16, 17].

Методология исследования

Оптическая модель (ОМ) [18] предполагает наличие реальной и мнимой частей потенциала ядерного взаимодействия отвечающие за рассеяние и поглощение, соответственно. В нерелятивистском уравнении Шредингера:

$$(T - E + V_{opt})\Psi = 0, \quad (1)$$

T – оператор кинетической энергии, E – энергия в системе центра масс, V_{opt} – оптический потенциал, описывающий ядерную материю. В общем случае оптический потенциал (ОП) выглядит как:

$$V_{opt} = V_{nucl.}(r) + V_{SO}(r)(\vec{l}, \vec{s}) + V_c(r), \quad (2)$$

где ядерный потенциал $V_{nucl.}(r)$:

$$V_{nucl.}(r) = -V_R * f(r_R, a_R) - i \left(W_V * f(r_V, a_V) + 4a_S W_S * \frac{d}{dr} f(r_S, a_S) \right). \quad (3)$$

Спин-орбитальное взаимодействие налетающей частицы с оболочками ядра-мишени:

$$V_{SO}(r) = \left(\frac{\hbar}{m_{\pi}c} \right)^2 \frac{1}{r} * \frac{d}{dr} (V_{SO} * f(r_{VSO}, a_{VSO}) + iW_{SO} * f(r_{W_{SO}}, a_{W_{SO}})). \quad (4)$$

Коэффициент $\left(\frac{\hbar}{m_{\pi}c} \right)^2$, что является комптоновской длиной волны нейтрального пимезона, предназначен для нормирования потенциала. Причем, в формулах (1), (2) и (3)

радиальная часть $f(r_i, a_i)$ берется как форм-фактор Вудса-Саксона:

$$f(r_i, a_i) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - r_i A_t^{\frac{1}{3}}}{a_i}\right)}. \quad (5)$$

Кулоновская часть оптического потенциала используется в виде однородной заряженной сферы:

$$V_c = f(x) = \begin{cases} \frac{Z_p Z_t e^2}{2R_c} \left(3 - \frac{r^2}{R_c^2}\right), & r \leq R_c \\ \frac{Z_p Z_t e^2}{r}, & r > R_c \end{cases} \quad (6)$$

Причем, кулоновский радиус во всех анализах был взят $R_c = 1.3^3 \sqrt{A_t} fm$.

Решая уравнение (1) получаем волновую функцию, которая асимптотически ведет себя как:

$$\Psi =_{r \rightarrow \infty} \exp(ikz) + f(\theta) \frac{\exp(ikr)}{r}, \quad (7)$$

где коэффициент перед расходящейся волной является амплитудой рассеяния, причем:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2. \quad (8)$$

Все расчеты по оптической модели для описания упругого рассеяния дейтронов были сделаны с помощью программы ECIS [21]. Программа имеет функционал для поиска оптимальных параметров для наилучшего совпадения теоретически предсказанных с экспериментальными угловыми распределениями дифференциальных сечений. В целях количественного описания «согласования» экспериментальных и теоретических дифференциальных сечений использовалась величина хи-квадрат:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[\sigma_i^{EXP} - \sigma_i^{TH}]^2}{\Delta\sigma_i^2}, \quad (9)$$

где σ_i^{EXP} , σ_i^{TH} и $\Delta\sigma_i^2$ — дифференциальные поперечные сечения экспериментальные, теоретически полученные с помощью ОП и экспериментально найденные абсолютные ошибки в сечениях, соответственно.

При выборе оптического потенциала может возникнуть, так называемые, дискретные и непрерывные неоднозначности параметров [22]. Это означает, что разный набор параметров ОП могут выдавать схожие результаты. Схожие результаты для упругого рассеяния хоть и не являются большой опасностью, для неупругих процессов маленькие изменения в параметрах может вызвать большие расхождения в ДПС. Ради физической обоснованности параметров ОП также использовалась величина «объемный интеграл».

$$J_V = -\frac{4\pi}{A_p A_t} \int V(r) r^2 dr. \quad (10)$$

Она в среднем должна быть равна величине нуклон-нуклонного взаимодействия, то есть $\sim 400 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}^3$. Оно происходит от более реалистичной реальной части оптического потенциала, который является полумикроскопическим описанием нуклон-нуклонного взаимодействия — модель двойной свертки [23]. Выглядит оно следующим образом:

$$V_{DF} = N_R \iint (\vec{R} + \vec{r}_T - \vec{r}_P) d^3\vec{r}_T d^3\vec{r}_P, \quad (11)$$

где $\rho_T(\vec{r}_T)$ — плотность ядерной материи у ядра-мишени, $\rho_P(\vec{r}_P)$ — плотность ядерной материи у налетающего ядра и $v_{NN}(\vec{R} + \vec{r}_T - \vec{r}_P)$ — эффективный потенциал взаимодействия между двумя нуклонами зависящий от относительного расстояния между ними. Функции плотностей ядерной материи должны быть нормированы на количество нуклонов в ядре:

$$\int \rho(\vec{r}) d\vec{r} = A \quad (12)$$

В данной работе модель двойной свертки использовалась для апробации найденных оптических потенциалов. Соответственно, ниже указаны функции плотности, выбранные для расчета потенциала двойной свертки для пары ^{13}C и d:

$$\rho_{^{13}\text{C}}(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_{^{13}\text{C}}}{a_{^{13}\text{C}}}\right)}, \quad (13)$$

$$\rho_d(r) = \rho_0 \exp\left(-\frac{r^2}{a_d^2}\right), \quad (14)$$

где ρ_0 – константа, которая находится с помощью нормировки плотности, как указано в формуле (12). Эффективное нуклон-нуклонного взаимодействие определялось по глобальному потенциалу МЗУ-Reid:

$$v_{NN}(r) = \left[7999 \frac{e^{-4r}}{4r} - 2134 \frac{e^{-2.5r}}{2.5r} \right] \text{MeV} \quad (15)$$

Неупругое рассеяние анализировалось для переходов в состояния 3.089 МэВ ($1/2^+$), 3.068 МэВ ($3/2^-$) и 6.864 МэВ ($5/2^+$) ядра ^{13}C . Рассмотрим деформированное ядро с длиной деформации δ_λ . Влияние этих деформаций может быть выражено как изменение радиуса, при

Результаты и обсуждение

Изначально было проведено исследование упругого рассеяния дейтронов на ^{13}C , для нахождения оптимальных оптических параметров. Из работ [19, 20] были взяты глобальная систематика и ее параметры. В рисунке 1 показаны вычисленные теоретические ДПС вычисленных с помощью программного кода ECIS [21].

В работе [20] автор пояснил, что его систематика хоть и согласовывалась хорошо с угловыми распределениями ДПС, но имела изъян в виде плохого описания энергетической зависимости полного сечения взаимодействия. По этой причине, были не использованы параметры ОП из данной систематики.

Систематика из [19] не смогла полномерно описать ДПС упругого рассеяния из числа вышеперечисленных. Но как было пояснено выше, полное сечение данная систематика описывала с хорошей точностью. За счет этого факта, было принято решение использовать параметры с данной систематикой, но с измененными глубинами потенциала. Спин-орбитальное взаимодействие не было включено, так как только упругое рассеяние при 13.7 МэВ [15] имело достаточное количество экспериментальных точек в задней полусфере, а как известно, спин-орбитальное составляющая оптического потенциала влияет лишь на ДПС в задней полусфере.

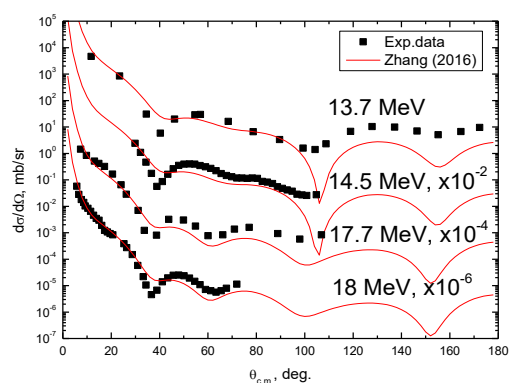
В настоящей работе были получены для каждого углового распределения 3 возможных варианта глубины реальной части — мелкий, средний и глубокий. Эти глубины соответствуют минимумам χ^2 что подтверждает наличие дискретной неоднозначности ОП. В таблице 1 указаны эти 3 набора параметров ОП. Причем, в таблице 1 W_S соответствует поверхностному

котором мы оцениваем оптические потенциалы, изменение, зависящее от относительной ориентации радиус-вектора по отношению к внутренней ориентации ядра. Деформированный радиус ядра будет выражаться как:

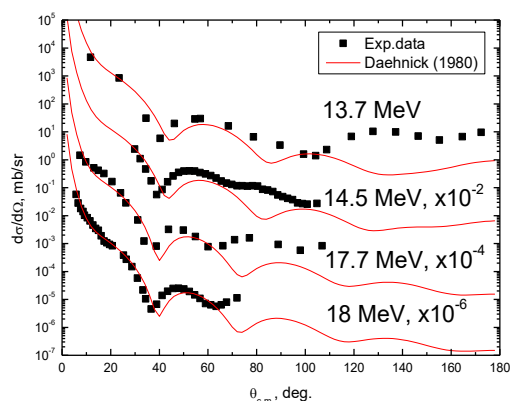
$$R(\theta, \phi) = R_0 \left(1 + \sum_{\lambda=1}^{\infty} \delta_\lambda Y_{\lambda 0}(\theta, \phi) \right) \quad (16)$$

И в этом виде использоваться в потенциале взаимодействия. Расчеты неупругого рассеяния дейтронов на ядрах ^{13}C проводились методом связанных каналов по компьютерной программе FRESKO [24].

потенциалу, а объемный потенциал был очень близок к ~ 0 и не был учтен. Для потенциала двойной свертки, единственным изменяемым параметром является коэффициент нормализации N_R , который был зафиксирован для всех энергий, на значении 0.7.



(a)



(б)

Рисунок 1 – Теоретические угловые распределения ДПС $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}$ полученных по глобальной систематике ОП из [20] (а) и [19] (б).

Таблица 1. Параметры ОП соответствующие минимумам χ^2 .

E_d , МэВ	Набор	V_r , МэВ	W_s , МэВ	J_V , МэВ*Фм ³	J_W , МэВ*Фм ³	χ^2/N
13.7	A	100.2	9.19	620.07	124.33	24.4
	B	50.0		309.32		111
	C	160.0		989.83		237
14.5	A	107.0	10.4	661.95	140.70	11.4
	B	50.0		309.32		81.9
	C	160.0		989.83		26.9
17.7	A	105.7	20.77	653.91	281.0	37.6
	B	50.0		309.32		91.3
	C	160.0		989.83		34.1
18	A	98.0	20.96	612.46	283.57	12.9
	B	50.0		309.32		85.8
	C	160.0		989.83		16.4

На рисунке 2 показаны как наборы А, В и С и потенциал двойной свертки описывают экспериментальные данные при перечисленных энергиях.

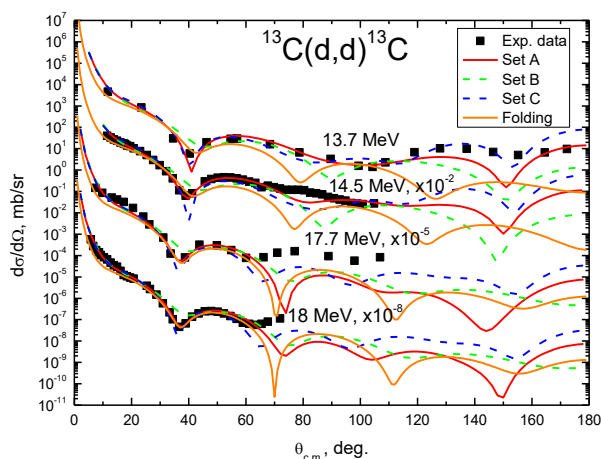


Рисунок 2 – Теоретические ДПС, полученные с помощью оптической и двойной свертки моделей в сравнении с экспериментальными данными.

Для оценки нахождения оптимальных глубин потенциала была изучена зависимость χ^2 от глубины реальной части, при фиксированных значениях геометрических параметров – радиуса и диффузности. Радиусы реальной и мнимой частей равны — 1.2 и 1.31 Фм соответственно, диффузности — 0.755 и 0.645 Фм, тоже соответственно. Значения глубин менялись от 30 МэВ до 250 МэВ с шагом 10 МэВ. Результаты показаны на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3 при низких энергиях рассеяния наблюдается несколько выраженных

минимумов χ^2 от глубины реальной части ОП. При увеличении энергии до 18 МэВ их количество уменьшается до двух, что согласуется с исследованиями упругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^{10}B в максимально широком диапазоне энергии [25]. В этой работе при энергии 91.8 МэВ наблюдается только один выраженный минимум χ^2 от глубины реальной части ОП.

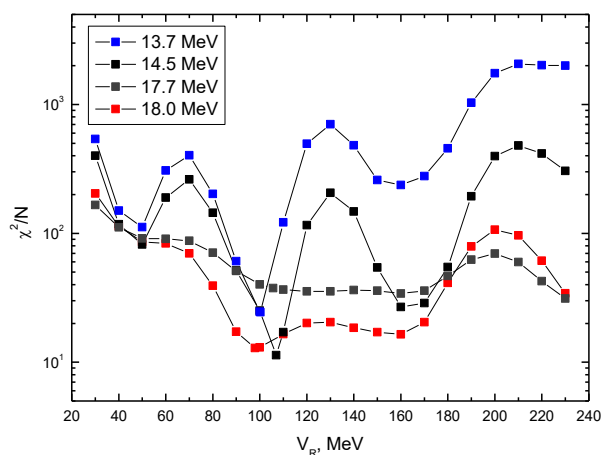


Рисунок 3 – Зависимость χ^2 от глубины реальной части оптического потенциала.

Геометрические параметры были зафиксированы.

При расчете неупругого рассеяния дейтронов на ядрах ^{13}C была использована коллективная модель. Для каждого возбужденного состояния было использована своя длина деформации. Схема связей ядра ^{13}C показана на рисунке 4.

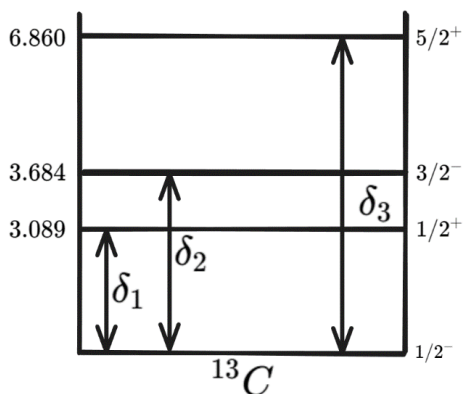
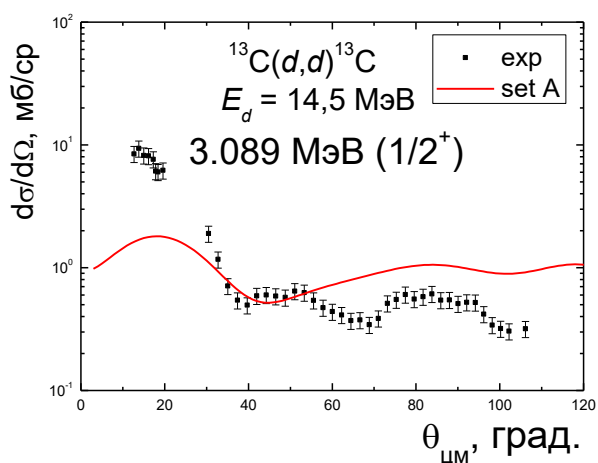


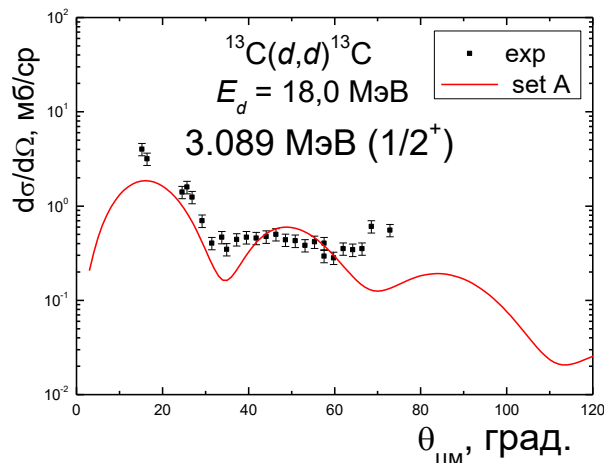
Рисунок 4 – Схема связей возбужденных состояний ядра ^{13}C .

На рисунках 5, 6 и 7 показаны результаты расчета по МСК для ДПС неупругих реакции $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}^*$ с возбуждениями на уровни: 3.089 МэВ ($1/2^+$), 3.684 МэВ ($3/2^-$) и 6.86 МэВ ($1/2^+$) при энергиях 14.5 и 18 МэВ. Параметры деформации были получены с помощью нормализации теоретических ДПС на экспериментальные ДПС в средних углах. Они показаны в таблице 2.

Как видно из рисунков 5-6, коллективная модель неплохо описывает поведение экспериментальных угловых распределений неупругого рассеяния, несмотря на довольно большой разброс значений δ_λ ранее полученных результатов, извлеченные нами параметры деформации не противоречат ранее полученным значениям.

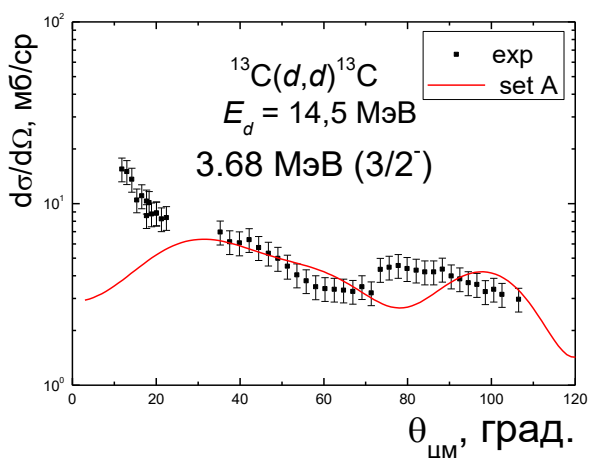


(a)

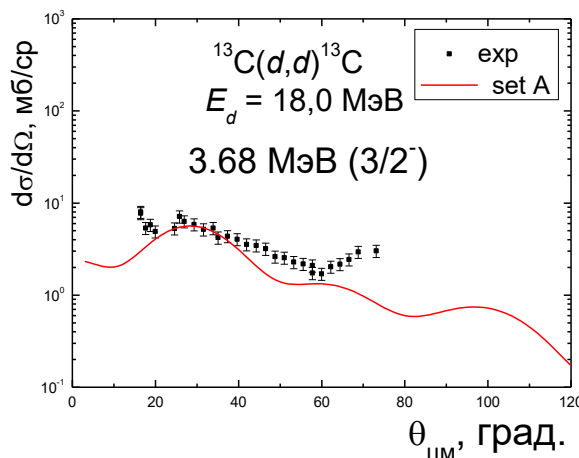


(б)

Рисунок 5 – Неупругое рассеяние дейтронов на ядрах ^{13}C при энергиях 14.5 МэВ и 18 МэВ с переходом в возбужденное состояние 3.089 МэВ ($1/2^+$).



(a)



(б)

Рисунок 6 – Неупругое рассеяние дейтронов на ядрах ^{13}C при энергиях 14.5 МэВ и 18 МэВ с переходом в возбужденное состояние 3.68 МэВ ($3/2^-$).

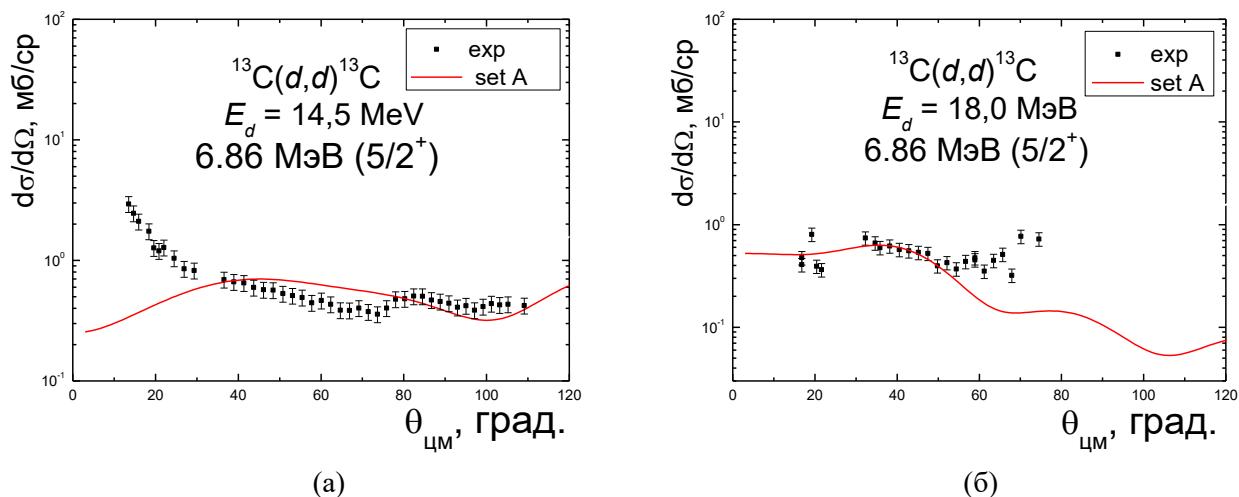


Рисунок 7 – Неупругое рассеяние дейтронов на ядрах ^{13}C при энергиях 14.5 МэВ и 18 МэВ с переходом в возбужденное состояние 6.86 МэВ ($5/2^+$).

Таблица 2. Параметры деформации полученные при расчете по МСК.

E_d , МэВ	E_x , МэВ	J^π	λ	δ_λ , Фм	δ_λ , Фм ссылки
14.5	3.089	$1/2^+$	1	0.68	0.242 [26]
	3.68	$3/2^-$	2	1.41	1.335 [26]
	6.86	$5/2^+$	3	0.68	0.176 [26]
18	3.089	$1/2^+$	1	0.56	0.536 [27]
	3.68	$3/2^-$	2	1.16	1.166 [27]
	6.86	$5/2^+$	3	0.68	0.468 [27]

Заключение

В настоящей работе проведено комплексное исследование упругого и неупругого рассеяния дейтронов на ядре ^{13}C в энергетическом диапазоне $E_d=13\div 18$ МэВ. На основе анализа экспериментальных данных выполнено сравнение различных оптических потенциалов, включая глобальные систематики и локальные параметры, полученные путем минимизации χ^2 . Исследование χ^2 -поверхности подтвердило наличие дискретных неоднозначностей параметров оптического потенциала. Были определены три набора параметров, мелкий, средний и глубокий, обеспечивающих сопоставимое качество описания упругих ДПС.

Используя найденные параметры ОП, выполнены расчеты неупругих процессов в рамках метода связанных каналов. Коллективная модель продемонстрировала хорошее согласование с экспериментальными данными для переходов в уровни 3.089 МэВ ($1/2^+$), 3.684 МэВ ($3/2^-$) и 6.86 МэВ ($5/2^+$) при энергиях 14.5 и 18 МэВ. Извлеченные параметры деформации оказались согласованы с ранее опубликованными

результатами и подтверждают коллективный характер низколежащих возбужденных состояний ядра ^{13}C .

Таким образом, полученные данные и выполненный анализ вносят вклад в уточнение параметров оптического потенциала для реакции $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}$, что является важным шагом для дальнейших исследований механизмов прямых реакций и структуры возбужденных состояний ядра ^{13}C . Результаты работы могут быть использованы при расчетах передач нуклонов, анализе кластерных состояний и развитии моделей, описывающих взаимодействие слабосвязанных ядер.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке программы № BR24992891 (Комплексные исследования по ядерной, радиационной физике и технике, физике высоких энергий и космологии для развития конкурентных технологий) Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Вклад авторов

С.К. Сахиев: привлечение финансирования, администрирование проекта; **Маулен Насурлла:** концептуализация, курирование данных, методология; **Н. Буртебаев:** научное руководство, администрирование проекта, написание – рецензирование и редактирование; **Н.О. Садуев:** научное руководство, администрирование проекта; **Д.А. Исаев:** формальный анализ, визуализация, программное обеспечение, написание – первоначальный вариант; **Маржан Насурлла:** формальный анализ, курирование данных; **Р.А. Ходжаев:** формальный анализ, проведение исследования; **К.А. Талпакова:** формальный анализ, проведение исследования; **А.К. Нурпейсов:** курирование данных, проведение исследования; **С.А. Турганова:** проведение исследования, программное обеспечение.

Литература

1. Y. Nishida, Elastic scattering of deuterons by heavy nuclei, *Progress of Theoretical Physics*, **19**(4), 389-403 (1958). <https://doi.org/10.1143/PTP.19.389>
2. C. Van Der Leun, & C. Alderliesten, The deuteron binding energy, *Nuclear Physics A* **380**(2), 261-269 (1982). <https://doi.org/10.26577/RCPH202592113>
3. J.H. Kelley, C.G. Sheu, & J.E. Purcell, Energy levels of light nuclei A= 13, *Nuclear Data Sheets* **198**, 1-448 (2024).
4. W. von Oertzen, M. Freer, & Y. Kanada-En'yo, Nuclear clusters and nuclear molecules, *Physics Reports* **432**(2), 43-113 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.07.001>
5. M. Milin, & W. Von Oertzen, Search for molecular bands in ^{13}C , *The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei* **14**(3), 295-307 (2002). <https://doi.org/10.26577/RCPH20259213>
6. Y. Chiba, & M. Kimura, Hoyle-analog state in ^{13}C studied with antisymmetrized molecular dynamics, *Physical Review C* **101**(2), 024317 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.101.024317>
7. Y.Y. Cao, D.Y. Tao, B. Zhou, & Y.G. Ma, Hoyle-analog state in ^{13}N . *Physical Review C* **112**(3), 034313 (2025). <https://doi.org/10.1103/d3f6-wpdb>
8. H. Fujimura, H. Akimune, I. Daito, M. Fujiwara, K. Hara, K. Y. Hara,... & M. Yosoi, Nuclear structure of the spin-isospin excited states in ^{13}N studied via the (^3He , t) and (^3He , tp) reactions at 450 MeV, *Physical Review C—Nuclear Physics* **69**(6), 064327 (2004). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.69.064327>
9. Z.H. Liu, C.J. Lin, H.Q. Zhang, Z.C. Li, J.S. Zhang, Y.W. Wu,... & Z.H. Peng, Asymptotic normalization coefficients and neutron halo of the excited states in ^{12}B and ^{13}C , *Physical Review C* **64**(3), 034312 (2001). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.64.034312>
10. A.S. Demyanova, A.N. Danilov, S.V. Dmitriev, A.A. Ogloblin, T.L. Belyaeva, N., Burtebaev,... & V.I. Zhrebchevskii, Spectroscopy of exotic states of ^{13}C . In *EPJ Web of Conferences* **66**, 02027 (2014). <https://doi.org/10.1051/epjconf/20146602027>
11. A.A. Ogloblin, A.S. Demyanova, A.N. Danilov, T.L. Belyaeva, S.A. Goncharov, & W. Trzaska, Nuclear states with anomalously large radius (size isomers), *Physics of Atomic Nuclei* **79**(4), 514-524 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1063778816040177>
12. M.M. Nagadi, A.A. Naqvi, M.A. Al-Ohali, F.Z. Khiari, & S. Kidwai, Deuteron Stripping Cross Section from ^{13}C at Deuteron Energies below 350 keV. *Australian Journal of Physics* **51**, 913-920 (1998).
13. G.D. Putt, Studies of some sub-Coulomb deuteron-induced reactions on ^{13}C and ^{12}C , *Nuclear Physics A* **161**(2), 547-564 (1971). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(71\)90386-1](https://doi.org/10.1016/0375-9474(71)90386-1)
14. R.J., Peterson, H.C., Bhang, J.J. Hamill, & T G. Masterson, The ^{14}C (α , α') ^{14}C and ^{13}C (d, p) ^{14}C reactions, *Nuclear Physics A* **425**(3), 469-492 (1984).
15. H. Guratzsch, J. Slotta, & G. Stiller, A study of deuteron scattering on ^{12}C and ^{13}C . *Nuclear Physics A* **140**(1), 129-140 (1970).
16. V.V. Dyachkov, N. T. Burtebaev, & A.V. Yushkov, Measuring elastically scattered 18 MeV deuterons and the shape of nuclei, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **76**(8), 895-900 (2012).
17. N. Burtebayev, D.M. Janseitov, Z. Kerimkulov, D. Alimov, M. Nassurla, D.S., Valiolda,... & A. Aimaganbetov, Elastic and Inelastic Scattering of Deuterons From ^{13}C , *Journal of Physics: Conference Series* **1555**(1), 012028 (2020). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1555/1/012028>
18. P.E. Hodgson, The nuclear optical model. *Reports on Progress in Physics* **34**(2), 765-819 (1971).
19. W.W. Daehnick, J.D. Childs, & Z. Vrcelj, Global optical model potential for elastic deuteron scattering from 12 to 90 MeV, *Physical Review C* **21**(6), 2253 (1980). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.21.2253>
20. Y. Zhang, D. Pang, & J.L. Lou, Optical model potential for deuteron elastic scattering with 1 p-shell nuclei, *Physical Review C* **94**(1), 014619 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.94.014619>
21. J. Raynal, Coupled channel calculations and computer code ECIS (No. CEA-CONF--9461), CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, 91-Gif-sur-Yvette (France), Service de Physique Theorique, 1988.
22. R.M. Drisko, G.R. Satchler, & R.H. Bassel, Ambiguities in the optical potential for strongly absorbed projectiles. *Physics Letters* **5**(5) (1963).

23. M. Karakoc, BiFold: A Python code for the calculation of double-folded (bifold) potentials with density-in/dependent nucleon-nucleon interactions, *Computer Physics Communications* **284**, 108613 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108613>
24. I.J. Thompson, Getting started with FRESKO, *Comput. Phys. Rep* **7**, 167-212 (1988).
25. M. Nassurlla, N. Burtebayev, S. Sakuta, M. Nassurlla, R. Khojayev, D. Alimov,... & A. Makhmut, A Study of Alpha-Particle Scattering on ^{10}B Nuclei at an Energy of 29 MeV, *Universe* **10**(1), 51 (2024). <https://doi.org/10.3390/universe10010051>
26. B. Urazbekov, N. Burtebayev, D. Janseitov, M. Nassurlla, D. Alimov, & D. Valiolda, Examination of collective and single-particle models for excited states of ^{13}C below 10 MeV in nuclear reactions induced by 18 MeV deuteron beam, *The European Physical Journal A* **60**(4), 86 (2024). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-024-01292-9>
27. R. J. Peterson, J. R. Shepard, & R. A. Emigh, Isoscalar and isovector transition amplitudes in $A=13$, *Physical Review C* **24**(3), 826 (1981).

Сведения об авторах:

- Сахиев Саябек Қуанышбекович – д.ф.-м.н., Генеральный директор, Институт ядерной Физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: s.sakhi@inp.kz).
- Маулен Насурлла – PhD, Заведующий лабораторией низкоэнергетических ядерных реакций (ЛНЭЯР), Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: nassurlla_inps@inp.kz).
- Буртебаев Насурлла – д.ф.-м.н., ВНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: nburtebayev@yandex.kz).
- Садуаев Нұржан Орынбасарович – PhD, Зам. генерального директора по научной работе, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: n.saduyev@inp.kz).
- Исаев Дамир Асанханұлы (автор-корреспондент) – магистрант, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: s.sakhi@inp.kz).
- Маржан Насурлла – PhD, СНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: morzhic@mail.ru).
- Ходжаев Ромазан Ахмеджанович – PhD студент, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан e-mail: ramazan_inp@mail.ru).
- Талпакова Қараиш Айдыралиевна – PhD студент, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: talpakova@inp.kz).
- Нурпейсов Айкен Қайратұлы – PhD студент, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: aiken9898@mail.ru).
- Турганова Санира Алимжановна – магистр, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: turganova.sanira.01@gmail.com).

Авторлар туралы мәлімет:

- Саябек Сахиев – ф.-м.ғ.д., Бас Директор, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: s.sakhi@inp.kz).
- Маулен Насурлла – PhD, Төмен энергиялы ядролық реакциялар зертханасының (ТЭЯРЗ) меңгерушісі, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: nassurlla_inps@inp.kz).
- Насурлла Буртебаев – ф.-м.ғ.д., ТЭЯРЗ ЖФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: nburtebayev@yandex.kz).
- Нұржан Садуаев – PhD, Бас директордың ғылым бойынша орынбасары, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: n.saduyev@inp.kz).
- Дамир Исаев (автор-корреспондент) – магистрант, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: s.sakhi@inp.kz).
- Маржан Насурлла – PhD, ТЭЯРЗ АФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: morzhic@mail.ru).
- Ромазан Ходжаев – PhD студент, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: ramazan_inp@mail.ru).
- Қараиш Талпақова – PhD студент, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: talpakova@inp.kz).
- Айкен Нұрпейсов – PhD студент, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: aiken9898@mail.ru).
- Санира Турганова – магистр, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: turganova.sanira.01@gmail.com).

Information about authors:

- Sayabek Sakhiyev – D. Sc. in Physics and Mathematics, General Director, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: s.sakhi@inp.kz).

Maulen Nassurlla – PhD, Head of Laboratory of low-energy nuclear reactions (LLENR), Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: nassurlla_inps@inp.kz).

Nassurlla Burtebayev – D. Sc. in Physics and Mathematics, LR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan e-mail: nburtebayev@yandex.kz).

Nurzhan Saduyev – PhD, Deputy Director General for Science, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: n.saduyev@inp.kz).

Damir Issayev (corresponding author) – M.Sc. student, JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: damir.isaev.15@gmail.com).

Marzhan Nassurlla – PhD, SR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: morzhic@mail.ru).

Romazan Khodjayev – PhD student, JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ramazan_inp@mail.ru).

Karashash Talpakova – PhD student, JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: talpakova@inp.kz).

Aiken Nurpeisov – PhD student, JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aiken9898@mail.ru).

Sanira Turganova – M.Sc., JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: turganova.sanira.01@gmail.com).

История статьи: *поступила: 10 февраля 2026; после доработки 20 апреля; принята: 15 мая 2026.*

Мақала тарихы: *түсті: 10 ақпан 2026; түзетілді: 20 сәуір; қабылданды: 15 мамыр 2026.*

Article history: *received: 10 February 2026; revised: 20 April; accepted: 15 May 2026.*