

концентрацией в сплаве Fe–31 ат. % Ga интерметаллид $\text{Fe}_{13}\text{Ga}_9$ выделяется в процессе охлаждения при $\sim 510^\circ\text{C}$, предотвращая выделение $\alpha\text{-Fe}_6\text{Ga}_5$.

Статья об исследованиях «Comparative Study of Structures and Phase Transitions in Fe–(31–35)Ga Alloys by *In Situ* Neutron Diffraction» авторов Т.Н.Вершининой, Н.Ю.Самойловой, С.В.Сумникова, А.М.Балагурова, В.В.Палачевой, И.С.Головина была опубликована в 2023 г. в *Journal of Alloys and Compounds* (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167967>).

Н. А. Федоров, Д. Н. Грозданов, Ю. Н. Копач

Метод меченых нейтронов и его применение для фундаментальных и прикладных исследований

Нейтроны являются уникальным инструментом, позволяющим изучать структуру вещества на разных масштабах: от наночастиц (10^{-9} м) до атомных ядер (10^{-15} м). Характерный размер исследуемых объектов и список возможных процессов, происходящих при прохождении нейтронов через вещество, определяются их энергией. Строение молекул и кристаллов исследуется с помощью нейтронов низких энергий (менее 0,03 эВ), а структура атомных ядер и ядерные реакции — в основном с помощью более быстрых нейтронов. Из-за своей электронейтральности нейтроны обладают большой проникающей способностью, что делает весьма привлекательным использование нейтронного излучения для неразрушающего элементного анализа, в досмотровых комплексах и при исследовании скважин (нейтронного каротажа).

$\sim 510^\circ\text{C}$, thus preventing the appearance of another monoclinic phase, $\alpha\text{-Fe}_6\text{Ga}_5$.

In 2023, the *Journal of Alloys and Compounds* published an article about the research “Comparative Study of Structures and Phase Transitions in Fe–(31–35)Ga Alloys by *In Situ* Neutron Diffraction” authored by T.N.Vershinina, N.Yu.Samoylova, S.V.Sumnikov, A.M.Balagurov, V.V.Palacheva, I.S.Golovin (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167967>).

N. A. Fedorov, D. N. Grozdanov, Yu. N. Kopatch

Tagged Neutron Method and Its Application for Fundamental and Applied Research

Neutrons are a unique tool that allows one to study the structure of matter at different scales: from nanoparticles (10^{-9} m) to atomic nuclei (10^{-15} m). The characteristic size of the objects that could be studied and the list of possible processes that take place in interaction of neutrons with matter are determined by their energy. The structure of molecules and crystals is studied using low-energy neutrons (< 0.03 eV), while the structure of atomic nuclei and nuclear reactions are mainly studied using faster neutrons. Due to their electrical neutrality, neutrons have a high penetrating power, which makes it very prospective to use neutron radiation for nondestructive elemental analysis, in inspection complexes and in geological research (neutron logging).

An important task in experiments with neutrons is to determine their energy. In contrast to charged particles and γ quanta, which with a fair-

Важной задачей при постановке экспериментов с нейтронами является определение их энергии. В отличие от заряженных частиц и γ -квантов, которые с достаточно большой вероятностью теряют всю свою энергию при взаимодействии с чувствительным объемом детектора, нейтроны обычно однократно или многократно рассеиваются в веществе детектора, не формируя выраженного пика полного поглощения. Поэтому для нейтронной спектроскопии чаще всего используется метод времени пролета (ToF), в котором энергия нейтрона вычисляется по времени, прошедшему с момента рождения нейтрона/начала нейтронного импульса до регистрации продуктов взаимодействия при известных расстояниях между источником нейтронов и исследуемым объектом (пролетных базах). Для реализации ToF строятся импульсные источники нейтронов, такие как ИБР-2, ИРЕН, импульсные

нейтронные генераторы. На стационарных источниках устанавливают прерыватели пучка.

Альтернативой импульсным источникам могут быть устройства, в которых рождение нейтронов происходит в реакции с вылетом заряженных частиц, которые легко зарегистрировать. Наиболее простой и эффективной для использования в таких установках является реакция $T(d, n)^4\text{He}$, так как ее сечение имеет ярко выраженный максимум около 100 кэВ, оно достаточно велико (около 5 б), угловое распределение ее продуктов близко к изотропному как в с.ц.м, так и в л.с. Рождающиеся в этой реакции нейтроны имеют энергию около 14 МэВ. Регистрация α -частицы, испущенной одновременно с нейтроном, с помощью позиционно-чувствительного детектора позволяет определить направление движения соответствующего нейтрона. С помощью временного интервала между

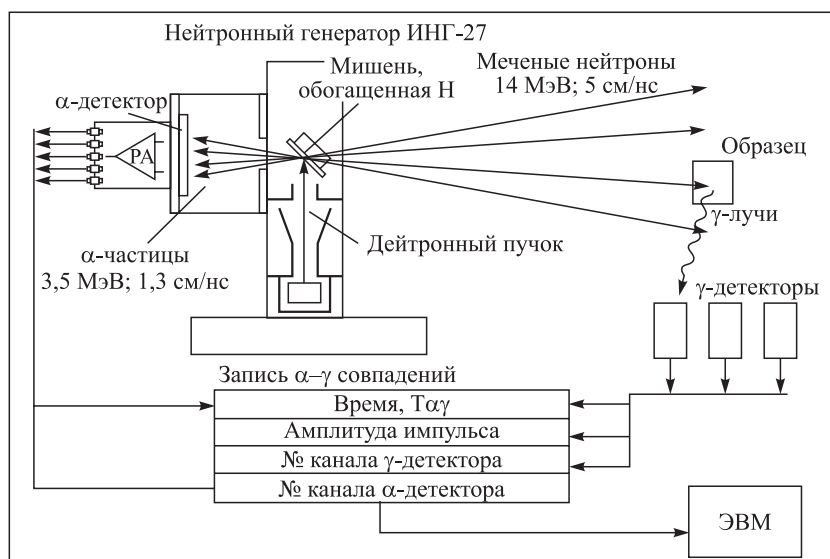


Рис. 1. Схема установки с реализацией ММН

Fig. 1. Scheme of the setup with the implementation of TNM

ly high probability lose all their energy when interacting with the sensitive volume of the detector, neutrons are usually singly or repeatedly scattered in the detector material without forming a noticeable full energy absorption peak. Therefore, for neutron spectroscopy, the time-of-flight (ToF) method is most often used, in which the neutron energy is calculated from the time elapsed from the moment of neutron emission/the beginning of a neutron pulse to the registration of reaction products at known distances between the neutron source and the object under study (flight bases). To implement ToF, pulsed neutron sources are being built, such as IBR-2, IREN, and pulsed neutron generators. Beam choppers are installed on stationary sources.

An alternative to pulsed sources can be devices in which the production of neutrons occurs in a reaction with the emission of charged particles that can be easily detect-

ed. The simplest and most efficient reaction for use in such devices is the $T(d, n)^4\text{He}$ reaction, since its cross section has a maximum at about 100 keV, it is quite large (about 5 b), and the angular distribution of its products is close to isotropic, as in center-of-mass system, as well as in lab system. The neutrons produced in this reaction have an energy of about 14 MeV. Registration of an α particle emitted simultaneously with a neutron using a position-sensitive detector makes it possible to determine the direction of motion of the corresponding neutron. The use of the time interval between the detection of an α particle and the reaction products in the test sample, together with information about the position of the triggered element of the α detector, makes it possible to determine the spatial coordinates of the point of interaction of the neutron with the nucleus.

регистрацией α -частицы и продуктов реакции в исследуемом образце и информации о положении сработавшего элемента α -детектора можно определить пространственные координаты точки взаимодействия нейтрона с ядром.

В эксперименте по исследованию рассеяния нейтронов разница во времени между срабатыванием α - и нейтронных детекторов позволяет определить энергию зарегистрированных частиц — реализовать метод ToF, аналогичный применяемому на импульсных источниках. Типичная схема установки, в которой реализуется обсуждаемая методика (метод меченых нейтронов, ММН), приведена на рис. 1.

В Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка с 2014 г. работает коллаборация TANGRA (Tagged Neutrons & Gamma Rays), занимающаяся изучением нейтрон-ядерных реакций с использованием метода меченых нейтронов, поиском новых путей использо-

вания нейтронных методов в фундаментальных и прикладных исследованиях. Приоритетным направлением работы является получение ядерных данных.

За прошедшие годы коллаборацией было поставлено значительное число экспериментов по измерению угловых распределений и выходов γ -излучения, испускаемого продуктами нейтрон-ядерных реакций. В качестве источника меченых нейтронов применялся компактный D-T генератор ИНГ-27; для регистрации γ -квантов использовались как кольцевые системы, состоящие из сцинтилляционных детекторов NaI и BGO, позволяющие измерять угловые распределения γ -излучения для наиболее интенсивных переходов, так и детектор из сверхчистого германия (HPGe), применяемый для измерения выходов интенсивных и достаточно слабых γ -линий. Схемы установок приведены на рис. 2.

Рис. 2. Схемы экспериментальных установок, используемых коллаборацией TANGRA. Все размеры приведены в миллиметрах

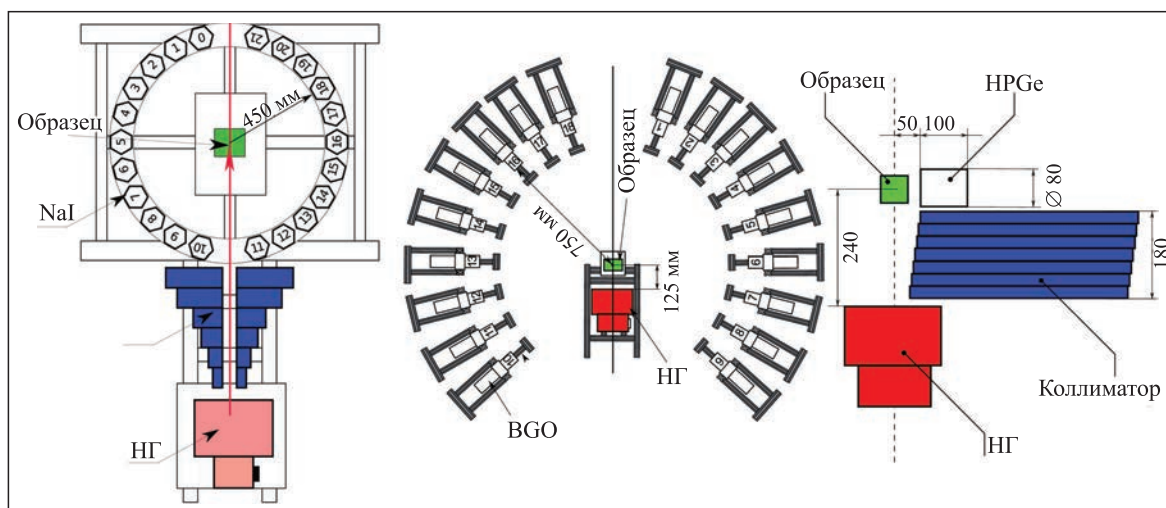


Fig. 2. Schemes of experimental setups used by the TANGRA Collaboration. All dimensions are given in mm

In an experiment to study neutron scattering, the difference in time between the operation of α and neutron detectors makes it possible to determine the energy of detected particles — to implement the ToF method, similar to that used on pulsed sources. A typical setup scheme in which the discussed technique is implemented (the tagged neutron method, TNM) is shown in Fig. 1. Since 2014, the TANGRA (TAGged Neutrons & Gamma RAYS) Collaboration has been working at FLNP JINR, which studies neutron-nuclear reactions using the tagged neutron method, searching for new ways to use neutron methods in fundamental and applied research. The priority area of work is the acquisition of nuclear data.

Over the past years, the Collaboration has carried out a significant number of experiments to measure the

angular distributions and yields of γ radiation emitted by the products of neutron-nuclear reactions. The ING-27 compact D-T generator was used as a source of tagged neutrons; both ring systems consisting of NaI and BGO scintillation detectors, which make it possible to measure the angular distributions of γ radiation for the most intense transitions, and a high-purity germanium (HPGe) detector were used to measure the yields of both intense and rather weak γ lines. The diagrams of the setups are shown in Fig. 2.

The usage of TNM allows one to separate useful events associated with reactions in the sample from background events arising due to the interaction of neutrons with the structural elements of the facility using time windows.

Применение ММН позволяет отделять полезные события, связанные с реакциями в образце, от фоновых, возникающих из-за взаимодействия нейтронов с конструкционными элементами установки, с помощью временных окон.

В ходе дальнейшей обработки из энергетических спектров γ -квантов, построенных на основе отобранных по времени событий, извлекаются выходы и угловые распределения (рис. 3).

Исследуемые нами параметры γ -излучения могут быть использованы для тестирования корректности модельного описания нейтрон-ядерных реакций [5]. Набор испускаемых в реакциях (n, γ) γ -квантов уникален для каждого ядра и может быть использован для идентификации элементов и даже изотопов. Это определяет востребованность получаемых нами данных для развития методики быстрого неразрушающего элементного анализа. В рамках проекта TANGRA офор-

Рис. 3. Энергетические спектры высокого разрешения для $^{56}\text{Fe}(n, \gamma)$ (слева), угловые распределения для двух наиболее интенсивных γ -линий в сравнении с другими работами (справа). Полученные нами результаты опубликованы в [4]

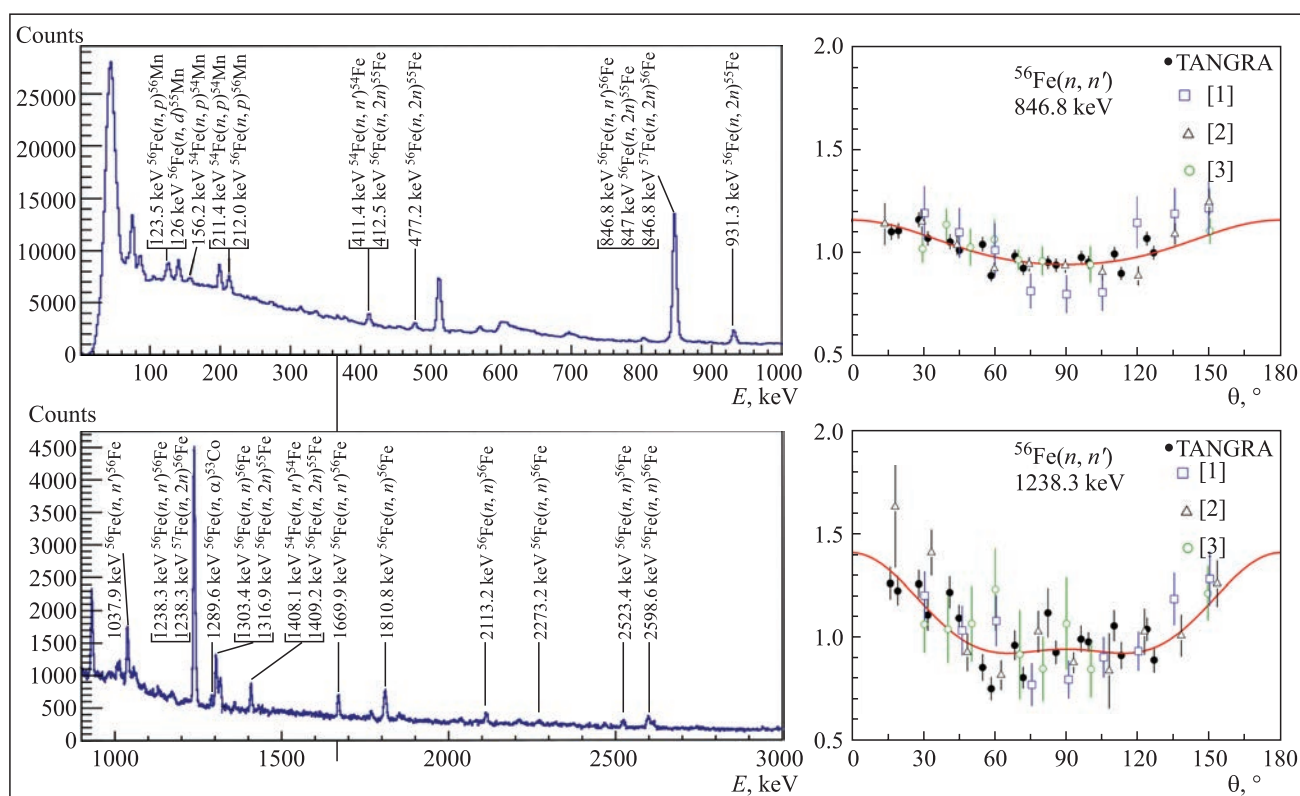


Fig. 3. High-resolution energy spectra for $^{56}\text{Fe}(n, \gamma)$ (left), angular distributions for the two most intense γ lines compared to other studies (right). Our results were published in [4]

In the further data processing, yields and angular distributions are extracted from the γ quanta energy spectra filled on the basis of time-selected events. An example of the obtained results is shown in Fig. 3.

The parameters of γ radiation studied by us can be used to test the correctness of the model description of neutron-nuclear reactions [5]. The set of γ quanta emitted in reactions (n, γ) is unique for each nucleus and can be used to identify elements and even isotopes. This determines the relevance of our data for the development of a technique for fast nondestructive elemental analysis. Within the framework of the TANGRA project, two areas of applied works were formulated. At present, the team

is assembling a setup for measuring the cross sections of γ -ray radiation, which will later be used to create a database similar to CAPGAM, but for fast neutrons. Then, the method of position-sensitive elemental analysis will be created and tested on the same setup. Another line of research is the creation of a compact mobile unit for measuring the concentration of carbon and other elements in soils, as well as the corresponding methodology. Information on the chemical composition of soils is important for the intensification of agriculture and ecology, but the traditional methods of obtaining it are chemical ones and are associated with labor-intensive sample preparation. The use of nuclear methods, and, in particular, TNM, makes

милось два направления прикладных работ. В настоящее время коллектив занимается сборкой установки для измерения сечений излучения γ -квантов, которые впоследствии будут использованы для создания базы данных, аналогичной CAPGAM, но для быстрых нейтронов. Затем на этой же установке будет создаваться и тестироваться методика позиционно-чувствительного элементного анализа.

Другим направлением исследований является создание компактной мобильной установки для измерения концентрации углерода и других элементов в почвах, а также соответствующей методики. Информация о химическом составе почв важна для интенсификации сельского хозяйства и экологии, но традицион-

ные методы ее получения — химические — связаны с трудоемкой пробоподготовкой. Применение ядерных методов, и в частности ММН, позволяет избавиться от этого трудоемкого этапа и существенно ускорить измерения. Дополнительным преимуществом ММН является возможность строить глубинные профили концентрации элементов, разделяя временные спектры на компоненты. Примерная схема мобильной установки для элементного анализа почв непосредственно в поле, а также пример выделения вкладов событий с разных глубин приведены на рис. 4. Результаты начального этапа этих работ опубликованы в [6].

При разработке мобильной установки требуется решить множество задач: необходимо оценить вли-

Рис. 4. Конструкция мобильной установки для элементного анализа почв (слева), пример определения концентрации углерода на разных глубинах с помощью разложения временного спектра (справа)

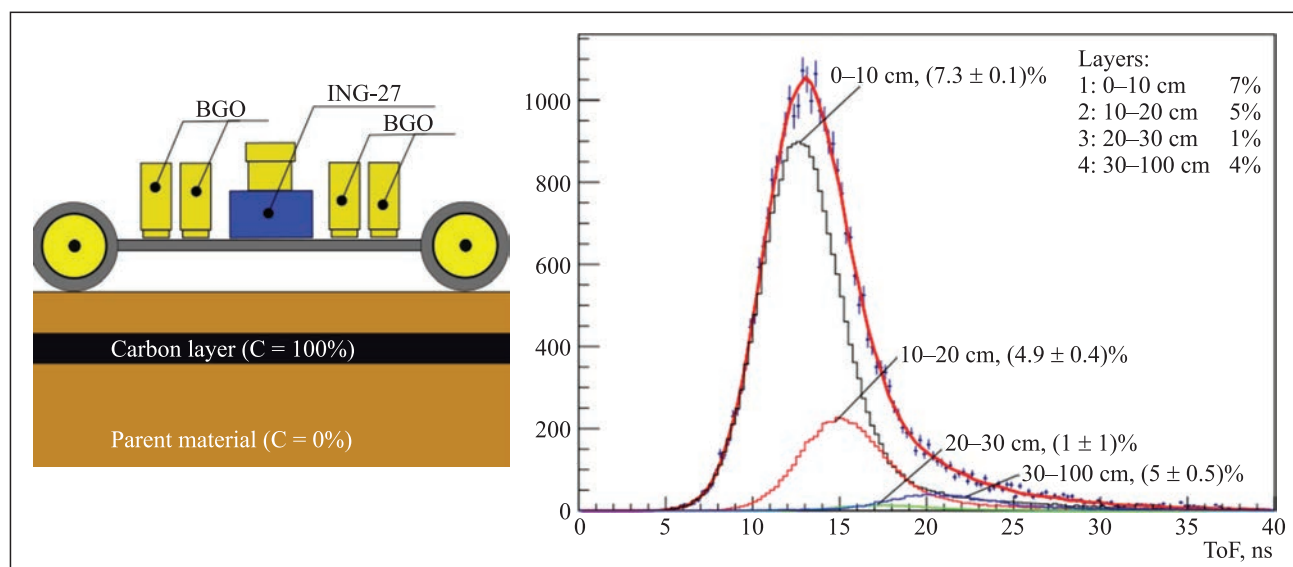


Fig. 4. The design of a mobile unit for elemental analysis of soils (left), an example of determining the concentration of carbon at different depths using the decomposition of the time spectrum (right)

it possible to get rid of this time-consuming stage and significantly speed up measurements. An additional advantage of TNM is the ability to build depth profiles of element concentrations by dividing the time spectra into components. An exemplary scheme of a mobile setup for elemental analysis of soils directly in the field and an example of highlighting the contributions of events from different depths are shown in Fig. 4. The results of the initial stage of these works were published in [6].

When developing a mobile setup, it is important to solve many problems: it is necessary to evaluate the effect of soil moisture and density on the data obtained, to choose the most optimal way to measure these values, and to learn how to separate the contributions of organic and inorganic substances to the total carbon concentration. So

far, there are no grounds to consider these problems unsolvable.

TANGRA is not going to stop at research and practical application of reactions ($n, \chi\gamma$). We have already set up an experiment to study the elastic and inelastic scattering of neutrons on carbon, in which the angular distributions of neutrons were measured [7]. At present, we continue to accumulate data for a more accurate study of the Hoyle state in ^{12}C . The most correct information about it is necessary for more accurate modeling of stellar nucleosynthesis. The Collaboration also plans to explore the reactions ($n, 2n$), (n, p), (n, α), which are a valuable source of information about the structure and shape of atomic nuclei.

яние влажности и плотности почвы на получаемые данные, выбрать наиболее оптимальный способ измерения этих величин, научиться разделять вклады органических и неорганических веществ в общую концентрацию углерода. Пока нет оснований считать эти задачи неразрешимыми.

TANGRA не собирается останавливаться на исследовании и практическом применении только реакций (n, γ). Нами уже был поставлен эксперимент по исследованию упругого и неупругого рассеяния нейтронов на углероде, в котором измерялись угловые распределения нейтронов [7], в настоящее время мы продолжаем накопление данных для более точного исследования состояния Хойла в ^{12}C . Максимально корректная информация о нем необходима для более точного моделирования звездного нуклеосинтеза. Также в планах коллаборации исследовать реакции ($n, 2n$), (n, p), (n, α), являющиеся ценным источником информации о структуре и форме атомных ядер.

Список литературы / References

1. *Abbondanno U., Giacomich R., Lagonegro M. et al.* // J. Nucl. Energy. 1973. V.27. P.227.
2. *Дегтярев А. П., Козырь Ю. Е., Проконец Г. А.* Угловое распределение γ -квантов, сопровождающих взаимодействие 14,6-МэВ нейтронов с ядрами ^{56}Fe , ^{23}Na // Материалы 4-й Всесоюзной конф. по нейтронной физике, 1977;
Degtyarev A. P., Kozyr Yu. E., Prokopets G. A. Angular Distribution of γ Quanta Accompanying the Interaction of 14.6-MeV Neutrons with ^{56}Fe , ^{23}Na Nuclei // Proc. of the 4th All-Union Conf. on Neutron Physics, 1977 (in Russian).
3. *Lachkar J., Sigaud J., Patin Y. et al.* // Nucl. Sci. Eng. 1974. V.55, No.2. P.168.
4. *Fedorov N. A., Grozdanov D. N., Kopatch Yu. N. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2021. V.57. P.194.
5. *Федоров Н. А.* Неупругое рассеяние быстрых нейтронов на ядрах магния, алюминия, кремния и железа. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2021;
Fedorov N. A. Inelastic Scattering of Fast Neutrons on the Magnesium, Aluminum, Silicon and Iron Nuclei. PhD in Phys. Math., Moscow: MSU, 2021 (in Russian).
6. *Alexakhin V. Y., Razinkov E. A., Rogov Y. N. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V.19. P.717.
7. *Дашков И. Д., Федоров Н. А., Грозданов Д. Н. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. С. 1081;
Dashkov I. D., Fedorov N. A., Grozdanov D. N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2022. V.86. P.1081.