

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ РЕАКТОРА ИБР-2**

*М. В. Булавин, П. А. Дорофеев, А. В. Галушко, А. В. Алтынов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе представлены результаты автоматизации процессов измерения мощности дозы и перемещения высокоактивных образцов в контролируемой зоне 3-го лучка реактора ИБР-2. Проведен детальный анализ выбора автоматизированной системы, которая основана на роботизированном манипуляторе с системой видеонаблюдения и измерения расстояний, а также дозиметрическим комплексом для определения мощности дозы в месте его работы. Подробно описаны процессы построения алгоритмов и программ для управления роботом.

Установлено, что система бесперебойно и безотказно работает в полях высокого ионизирующего излучения, способна практически полностью заменить человека при проведении таких работ и, что самое важное, существенно, до 27,4 %, снизить годовую дозу, получаемую персоналом в процессе работы.

The paper presents the results of automation of the processes of measuring the dose rate and movement of highly active samples in the controlled zone of the third beam of the IBR-2 reactor. A detailed analysis of the choice of an automated system, which is based on a robotic manipulator, with a video surveillance system and distance measurement, as well as a dosimetric complex for determining the dose rate along with its work, has been carried out. The processes of constructing algorithms and programs for controlling a robot are described in detail.

It has been established that the system operates smoothly and reliably in the fields of high ionizing radiation, is capable of almost completely replacing a person during such work and, most importantly, significantly, up to 27.4%, reduces the annual dose received by personnel during work.

PACS: 28.41.Mu; 07.07.Tw; 29.50.+v; 42.88.+h; 61.80.Ng

### **ВВЕДЕНИЕ**

Установка для облучения различных материалов на модернизированном реакторе ИБР-2 с целью изучения их радиационной стойкости находится в эксплуатации с 2012 г. [1–4]. Высокая плотность нейтронного потока при взаимодействии с исследуемым образцом приводит к появлению довольно высокой наведенной активности как самого образца, так и конструктивных элементов облучательной установки. При этом, как правило, после облучения все образцы можно условно разделить на две группы: требующие срочного проведения нейтронно-активационного анализа короткоживущих изотопов (от нескольких часов до 2 сут после облучения), например, [5, 6], и не требующие такого анализа [7–11]. Учитывается тот факт, что в первые часы после облучения основной вклад в наведенную активность обычно вносят именно короткоживущие изотопы, перемещение содержащих их образцов с конструктивных

элементов установки может стать проблемой из-за экстремально больших значений этой самой активности (до 1 Зв/ч).

Проблема усугубляется тем, что в контролируемой зоне реактора (КЗ), где функционирует облучательная установка, проектом не предусмотрены какие-либо автоматические транспортные или пневмотранспортные системы, а перемещение образцов происходит либо вручную, либо механическими захватами разной длины. Использовать такие захваты для снятия высокоактивных образцов не всегда удобно и, возможно, в основном из-за потенциально высокой радиационной нагрузки на персонал, связанной с длительным нахождением у образца. Из-за этого проведение некоторых важных и интересных экспериментов по облучению на установке либо связано с высоким риском получения персоналом сверхустановленной нормативом дозы, либо вообще запрещено.

Решением данной проблемы может стать, например, использование в КЗ автоматизированной системы на основе роботизированного манипулятора с захватом, способного перемещать высокоактивные образцы с конструкционных элементов облучательной установки в хранилище или транспортный контейнер внутри контролируемой зоны реактора ИБР-2 с одновременной возможностью контроля мощности дозы излучения во время работы.

Поэтому целью данной работы является создание такой системы и тестирование ее работоспособности в полях высокого ионизирующего излучения вблизи высокоактивных образцов во время их перемещения.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1) провести монтаж и пусконаладочные работы автоматизированного манипулятора, системы видеонаблюдения и дозиметрического контроля в КЗ во время работы на облучательной установке реактора ИБР-2;

2) используя программное обеспечение роботизированного манипулятора, создать алгоритм измерения мощности дозы в разных точках КЗ и перемещения контейнеров с радиоактивными образцами в разные места облучательной установки или в хранилище твердых радиоактивных отходов (ТРО);

3) во время проведения реакторных циклов облучить образцы и произвести измерения мощности дозы в разных точках КЗ, а также провести перемещение контейнеров с образцами после облучения по созданным алгоритмам;

4) сделать выводы и дать заключение о работоспособности такой системы в полях высокого ионизирующего излучения и о реальном снижении дозовой нагрузки на персонал.

## **1. ПРИНЦИП РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МАНИПУЛЯТОРА С СИСТЕМОЙ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ И ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

Автоматизированная система роботизированного манипулятора представлена на рис. 1, 2. Роботизированный манипулятор фирмы Fanuc (FANUC Europe Corporation S.A.) 1 находится с правой стороны от рельсового пути 6, по которому облучательная установка 9 с образцами в транспортных контейнерах 8 перемещается к активной зоне или от нее.

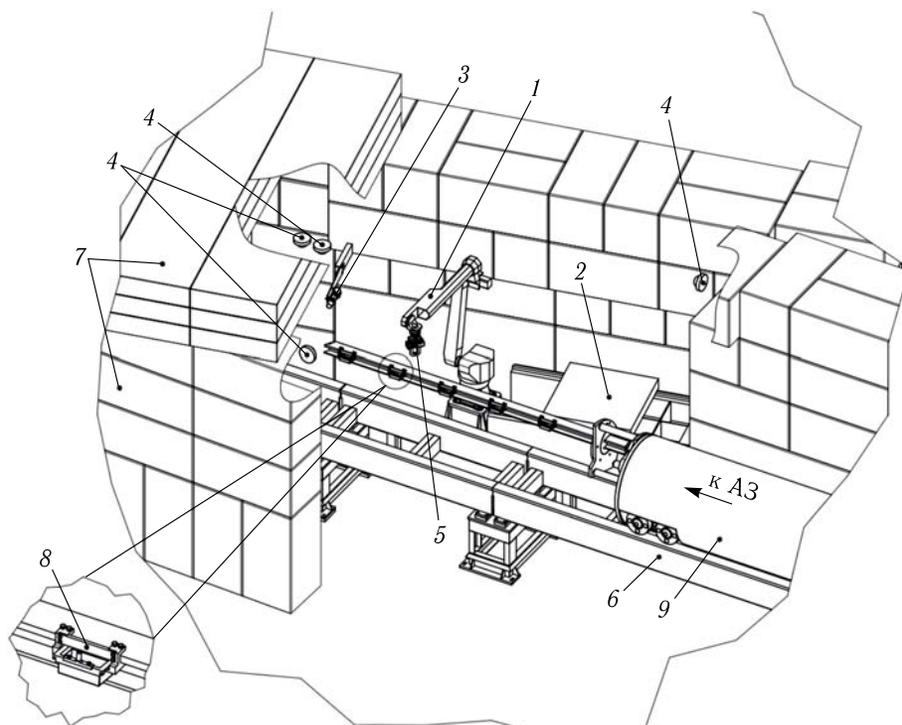


Рис. 1. Автоматизированная система роботизированного манипулятора в контролируемой зоне ИБР-2: 1 — робот; 2 — хранилище ТРО; 3 — блок детектирования датчика ионизирующего гамма-излучения; 4 — камеры высокого разрешения системы видеонаблюдения; 5 — пневматический захват с лазерным целеуказателем и видеокамерой высокого разрешения; 6 — рельсовый путь; 7 — биологическая защита КЗ; 8 — контейнеры для образцов, расположенные на транспортном двутавре ( $L = 3$  м) облучательной установки; 9 — облучательная установка; АЗ — активная зона с водяным замедлителем ВЗ-303 реактора ИБР-2

Робот оснащен пневматическим захватом 5 с лазерным целеуказателем (1, см. рис.2) для автоматического захвата и перемещения радиоактивных образцов, а также видеокамерой высокого разрешения (2, см. рис. 2) для дистанционного управления. Дистанционное программирование и управление роботизированным манипулятором также осуществляется при помощи видеокамер 4, расположенных в разных местах контролируемой зоны, с перекрытием всех зон видимости. Из них три камеры — это поворотные IP-видеокамеры модели Active Cam AC-D6124 с возможностью 25-кратного оптического приближения и две камеры — статические камеры высокого разрешения Trassir TR-D8121WDIR-2 с частотой более 25 кадров/с и возможностью 32-кратного увеличения. Одна из статических камер расположена на пневматическом захвате, а вторая — под крышей биологической защиты 7, ближе всего к АЗ.

Перемещение облученных высокоактивных контейнеров с образцами 8 с транспортного двутавра осуществляется в специальное хранилище твердых радиоактивных

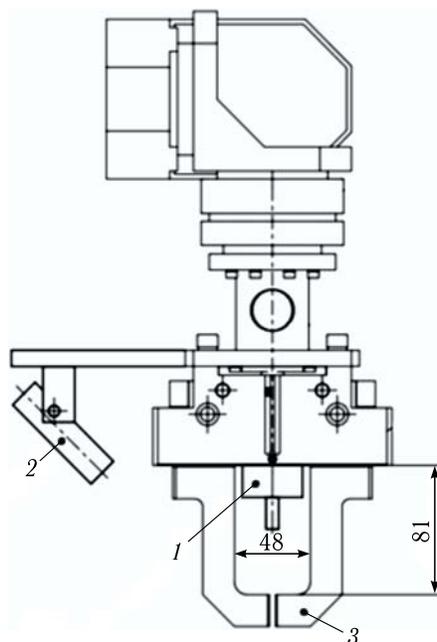


Рис. 2. Пневматический захват робота: 1 — лазерный целеуказатель; 2 — видеокамера высокого разрешения; 3 — подвижные губки

нен с ПУ при помощи длинного кабеля, позволяющего оператору находиться на значительном удалении от места нахождения высокоактивных образцов. Информация о мощности дозы отображается на дисплее измерительного пульта и может быть выведена на монитор ПК.

отходов (ТРО) 2, которое имеет множество ячеек для хранения. Дозиметрическая система с блоком детектирования гамма-излучения 3 находится под крышей биологической защиты контролируемой зоны в непосредственной близости от пневматического захвата робота.

Принцип работы автоматизированной системы заключается в следующем. Облучательная установка после окончания стандартного реакторного цикла перемещается в КЗ в заданную точку на рельсовом пути, которая привязана к системе координат робота. Нахождение установки в данной точке фиксируется при помощи системы видеонаблюдения. На первом этапе перед захватом контейнера с образцами необходимо дистанционно оценить радиационный фон вблизи установки. Для этого при помощи выносного пульта управления (ПУ) роботом (рис. 3) запускается заранее написанный программный алгоритм его действий, следуя которому пневматический захват передвигается к блоку детектирования 3, соединенному кабелем длиной 25 м с измерительным пультом, расположенным за пределами КЗ. Контроллер управления роботом находится в безопасной зоне, на расстоянии  $\sim 30$  м от КЗ и соединен с ПУ при помощи длинного кабеля, позволяющего оператору находиться на значительном удалении от места нахождения высокоактивных образцов. Информация о мощности дозы отображается на дисплее измерительного пульта и может быть выведена на монитор ПК.



Рис. 3. Контроллер управления роботом и выносной пульт

После захвата блока детектирования пневматический захват робота перемещается на расстояние  $\sim 100$  мм (измерение вблизи контейнера) от контейнера облучательной установки, который планируется снимать, и проводит измерение мощности дозы в течение 30 с (рис. 4), а затем на расстояние  $\sim 500$  мм (расстояние до тела человека с учетом вытянутых рук во время работы) с тем же измерением мощности дозы, после чего возвращает блок детектирования на место и переходит в домашнее положение.

Полученные данные сохраняются и анализируются, после чего оператор приступает к процедуре перемещения контейнера (-ов) с образцами в хранилище ТРО (рис. 5, а, б). Для этого запускается следующий программный алгоритм, который отвечает за перемещение одного или нескольких контейнеров, в зависимости от потребностей экспериментаторов. В конце любого программного алгоритма робот возвращается в домашнее положение, а облучательная установка перемещается в реакторный



Рис. 4. Фото одной из камер системы видеонаблюдения, сделанное в момент измерения мощности дозы у поверхности образца



Рис. 5. Робот в процессе перемещения контейнеров: а) перед захватом; б) в процессе транспортировки к хранилищу ТРО

зал до следующего цикла облучения. Образцы, перемещенные в контейнер, хранятся там до тех пор, пока их не нужно будет транспортировать для дальнейших исследований или утилизации.

## **2. СОЗДАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ДОЗЫ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ С ОБРАЗЦАМИ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ РОБОТИЗИРОВАННОГО МАНИПУЛЯТОРА**

Создание оператором алгоритмов для управления роботом-манипулятором Fanuc происходит на языке программирования KAREL. Язык KAREL позволяет обрабатывать данные, связываться с соответствующим оборудованием, контролировать его и взаимодействовать с оператором. KAREL представляет собой смесь языков высокого уровня, таких как PASCAL и PL/1, и включает в себя структуры, общие для языков высокого уровня, а также функции, разработанные специально для робототехники.

Режим работы роботизированного манипулятора при измерении мощности дозы и перемещении контейнеров является автоматическим, с использованием предварительно заданной программы-алгоритма. «Ручное» управление роботом производят только в крайнем случае, когда по какой-либо причине автоматический режим работы невозможен.

Программирование робота, в первую очередь, заключается в задании основных точек и способов перемещения между ними в указанной системе координат. Система координат может быть связана непосредственно с осями робота, с местом его расположения, с инструментом (в данном случае — пневматический захват) или с операционным полем (облучательная установка).

Для работы с контейнерами была создана система координат, привязанная к облучательной установке: координаты  $x$  и  $y$  лежат в плоскости профиля двутавра для установки образцов, по его длине и ширине, а координата  $z$  образует нормаль к его поверхности.

Поскольку величина смещения при установке креплений контейнеров с образцами на транспортном двутавре выше погрешности осевых перемещений робота, выполнять разгрузку циклом однотипных манипуляций со смещением по оси  $x$  (функция Offset) оказалось невозможно, и для перемещения каждого контейнера был написан отдельный блок программы.

Программирование манипулятора осуществляется через выносной ПУ. Оператор командами перемещения на ПУ подводит робота в требуемое положение и записывает координаты данной точки в программу с указанием скорости перемещения и типа интерполяции (сглаживания траектории при прохождении данной точки, если она не является крайней в записываемом перемещении робота). Далее оператор приводит робота в следующее положение и сохраняет следующую точку в программе. И так до тех пор, пока не проведет робота до необходимого места по безопасной траектории — в данном случае на точку захвата контейнера.

Далее происходит вызов подпрограммы захвата контейнера губками. По ее завершении оператор записывает точки траектории переноса контейнера к хранилищу

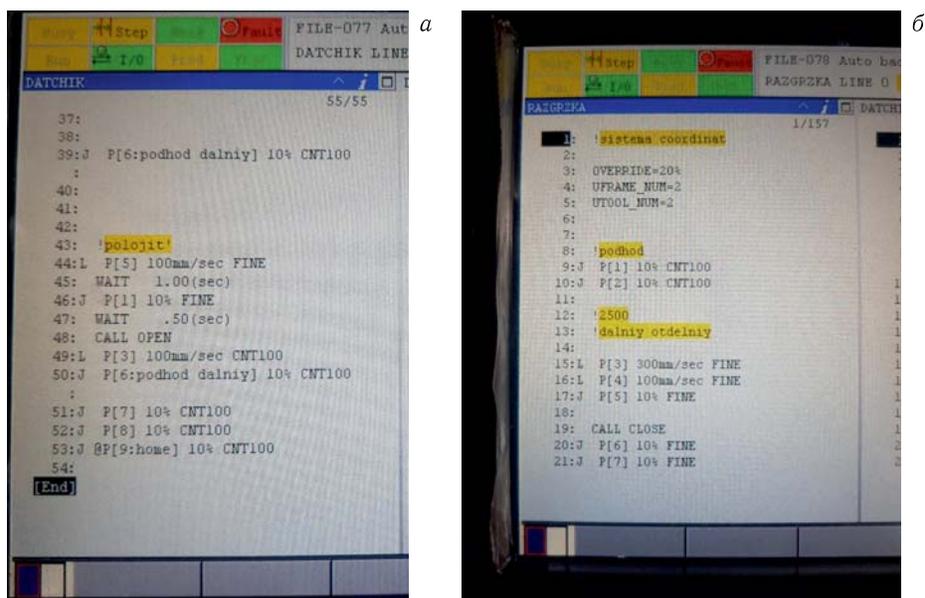


Рис. 6. Скриншоты алгоритмов с ПУ манипулятора: а) алгоритм для проведения измерения мощности дозы; б) алгоритм для перемещения контейнеров с высокоактивными образцами

ТРО, где происходит вызов подпрограммы разжимания подвижных губок пневматического захвата. После этого робот переводится оператором на точку подхода, если необходимо снять еще контейнеры, или возвращается в домашнее положение, если разгрузка образцов закончена.

При написании алгоритма для перемещения контейнеров нужно учитывать одну важную особенность. После перемещения облучательной установки в КЗ робот оказывается замкнутым в ограниченном пространстве между стеной биологической защиты и самой установкой, а контейнеры с образцами — закрепленными на двутавре на расстоянии около 1,5 м от места установки робота. Поэтому подход манипулятора от места стоянки и места хранения ТРО к месту крепления контейнеров осуществляется по сложной и длинной траектории, исключающей вероятность столкновения элементов робота с окружающими его конструкциями.

Некоторые примеры созданных алгоритмов для измерения мощности дозы и перемещения контейнеров представлены на рис. 6, а, б.

### 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБРАЗЦОВ И ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ДОЗЫ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО РЕАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксплуатация автоматизированной системы в условиях реального реакторного эксперимента была начата в ноябре 2018 г. За это время автоматизированная система была использована при работе в 10 циклах работы реактора ИБР-2, проведены несколько десятков измерений мощности дозы и перемещений контейнеров.

Все контейнеры с образцами располагались в разных местах транспортного двутавра от 100 до 3000 мм до поверхности водяного замедлителя реактора и имели разную наведенную активность после облучения, от 10 до 800 мЗв/ч. За все время проведения работ электроника автоматизированной системы проработала без сбоев.

В таблице приведены значения средней мощности дозы гамма-излучения за год вблизи контейнеров с образцами (на расстоянии 100 и 500 мм) после облучения вблизи реактора, которые необходимо было перемещать по условиям эксперимента. Полученные измерения использовали для расчета годовой дозы, которая могла быть получена персоналом облучательной установки при перемещении контейнеров вручную или при помощи механических захватов, а также дежурным дозиметристом, проводящим измерения перед началом работы персонала в КЗ. Опытным путем установлено, что среднее время работы в КЗ для дежурного дозиметриста составляет 60 с, для персонала облучательной установки — 180 с за один цикл работы реактора. Для удобства время работы в таблице приведено в часах.

**Средняя мощность дозы и годовая доза персонала, рассчитанная на основании данных, полученных при помощи роботизированного манипулятора**

Параметр	Дежурный дозиметрист	Персонал облучательной установки
Средняя годовая мощность $D_1$ дозы от контейнера с образцами на расстоянии 10 см от его поверхности, мЗв/ч	273,13	273,13
Средняя годовая мощность дозы $D_2$ от контейнера с образцами на расстоянии 50 см от его поверхности, мЗв/ч ( $M_{50}$ )	10,93	10,93
Среднее время работы персонала $t_1$ в КЗ при измерении мощности дозы и перемещении образцов за 1 цикл работы реактора, ч	0,0167	0,05
Среднее время работы персонала $t_2$ в КЗ при измерении мощности дозы и перемещении образцов за 1 год, ч	0,167	0,5
Средняя годовая доза $A$ , мЗв	1,83	5,47
Доля от средней годовой дозы для персонала группы А, %	9,1	27,4

Для расчета средней годовой дозы использовалась следующая формула:

$$A = D_2 t_2, \quad (1)$$

где  $D_2$  — средняя годовая мощность дозы от контейнера с образцами на расстоянии 50 см от его поверхности (в мЗв/ч);  $t_2$  — среднее время работы персонала в КЗ при измерении мощности дозы и перемещении образцов за 1 год (в ч).

Измерения и проведенные на их основе расчеты показали, что в процессе кратковременной работы по измерению мощности дозы у поверхности контейнеров и их перемещению, персонал получает среднюю годовую дозу, равную от  $\sim 9,1$  до 27,4% от годовой дозы для персонала группы А, установленной в [13].

Такие процентные соотношения являются довольно существенными, поскольку ни у персонала в категории дежурного дозиметриста, ни у персонала, непосредственно

занятого на работах на облучательной установке, данный вид деятельности не является единственным при работе с радиоактивными материалами или веществами. Это значит, что без использования созданной автоматизированной системы, которая реально помогла практически полностью заменить персонал, увеличения получаемой им годовой дозы не избежать. Поскольку забота о здоровье человека и об охране его труда путем снижения получаемой годовой дозы является приоритетной задачей любой организации, работающей с радиоактивными материалами или веществами, создание подобных систем на исследовательских реакторах или прочих ядерно-исследовательских установках жизненно важно и необходимо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизация системы перемещения высокоактивных образцов и измерения мощности дозы в контролируемой зоне 3-го пучка реактора ИБР-2 позволила оптимизировать работу персонала на облучательной установке. Результатом этой оптимизации стало существенное снижение, почти на 30 %, дозовой нагрузки на персонал. Кроме того, система позволяет проводить перемещение образцов с экстремально высоким уровнем активности сразу же после окончания облучения, что ранее было абсолютно невозможно. Поскольку безотказность системы при работе в полях высокого ионизирующего излучения доказана в процессе ее эксплуатации, она может быть рекомендована для использования на других исследовательских пучках ИБР-2 или любых подобных ядерно-физических установках или в организациях, работающих с высокоактивными РАО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bulavin M. et al.* Irradiation Facility at the IBR-2 Reactor for Investigating Material Radiation Hardness // Nucl. Instr. Meth. B. 2014. V. 12, No. 2.
2. *Bulavin M. et al.* Spectrum and Density of Neutron Flux in the Irradiation Beam Line No. 3 of the IBR-2 Reactor // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 2. P. 336–343.
3. *Bulavin M., Kulikov S.* Current Experiments at the Irradiation Facility of the IBR-2 Reactor // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1021, No. 1. P. 012041.
4. *Булавин М.В., Куликов С.А.* Установка для исследования радиационных повреждений в материалах и электронных компонентах // Новости ОИЯИ. 2019. № 1. С. 21–23; *Bulavin M. V., Kulikov S. A.* Facility for Radiation Damage Studies in Materials and Electronic Components // JINR News. 2019. No. 1. P. 21–23.
5. *Bulavin M. V. et al.* About Model Experiments on Production of Medical Radionuclides at the IBR-2 Reactor // Proc. of XXVI Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei “Fundamental Interactions, Neutrons, Nuclear Structure, Ultra Cold Neutrons, Related Topics”, Xian, China, 2019. P. 193–197.
6. *Дмитриев А. Ю. и др.* Керамика Болгара: первые результаты применения нейтронно-активационного анализа // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 6(225). С. 781–801.
7. *Chokheli D. et al.* Light Yield and Radiation Hardness Studies of Scintillator Strips with a Filler // Nucl. Instr. Meth. A. 2019. V. 930. P. 87–94.

8. *Рябухин О. В. и др.* Радиационное окрашивание уральских топазов с использованием электронного и нейтронного излучений // XII Иссык-Кульская междунар. школа-конф. «Радиационная физика твердого тела» (SCORPh-2017), 3–9 авг. 2017 г.; Физика. 2017. № 1. С. 55–57.
9. *Khatchenko Yu. et al.* Study of Neutron Irradiation-Induced Color in Topaz at the Pulsed Reactor IBR-2 // Proc. of XXV Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei “Fundamental Interactions, Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics”, Dubna, May 22–26, 2017.
10. *Bolshakova I.* Experimental Evaluation of Stable Long Term Operation of Semiconductor Magnetic Sensors at ITER Relevant Environment // Nucl. Fusion. 2015. V. 55, No. 8. P. 083006.
11. *Bolshakova I. et al.* Metal Hall Sensors for the New Generation Fusion Reactors of DEMO Scale // Nucl. Fusion. 2017. V. 57, No. 11.
12. *Булавин М. В., Куликов С. А.* Робот Вам в помощь! // Дубна: наука, содружество, прогресс. 2018. № 48(4442). 6 дек.
13. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.

Получено 23 сентября 2020 г.