










М.Т. Айткулов\* , Д.С. Дюсамбаев , А.М. Аханов   
К.С. Киселев , Ж.Т. Бұғыбай , Н.К. Романова   
Ш.Х. Гизатулин , А.А. Шаймерденов , Д.А. Накипов 

Институт ядерной физики, Казахстан, г. Алматы

\*e-mail: maitkulov@inp.kz

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РАДИАЦИОННОГО ОКРАШИВАНИЯ ТОПАЗОВ В РЕАКТОРЕ ВВР-К

В настоящее время радиационные технологии очень широко применяются в промышленности, в медицине и других сферах. Одним из частных случаев применения таких технологий является радиационное окрашивание полудрагоценных топазов. В результате применения указанной технологии бесцветные топазы приобретают более благородный цвет, что является выгодным с экономической точки зрения. Для этого можно применять разные виды радиационного излучения. В случае радиационного окрашивания топазов с использованием нейтронов необходимо создать оптимальные условия для их облучения. Так, в зоне облучения топазов необходимо создать «жесткий» спектр нейтронов. Это необходимо не только для формирования центров окраски, но и для снижения остаточной радиоактивности в них. В данной работе оценивалась возможность реализации технологии радиационного окрашивания топазов в исследовательском реакторе ВВР-К Института ядерной физики Республики Казахстан. Для этого было определено энергетическое распределение нейтронов в центральных и периферийных облучательных позициях реактора ВВР-К. На основе этих данных была произведена оценка времени, необходимого для достижения целевого флюенса нейтронов ( $10^{18}$  см<sup>-2</sup>). Показано влияние плотности потока тепловых нейтронов на активацию природных примесей в топазах. Приведены результаты пробного облучения топазов в штатном облучательном канале в реакторе ВВР-К. Предложены пути оптимизации условий облучения топазов в реакторе ВВР-К с целью улучшения экономической эффективности работ.

**Ключевые слова:** реактор ВВР-К, топаз, облучательный канал, флюенс нейтронов, оптимизация, плотность потока нейтронов, энергетический спектр нейтронов, радиационные технологии.

M. Aitkulov\*, D. Dyussambayev, A. Akhanov, K. Kisselyov, Zh. Bugybay,  
N. Romanova, Sh. Gizatulin, A. Shaimerdenov, D. Nakipov

Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

\*e-mail: maitkulov@inp.kz

### Analysis of the possibility of irradiation-induced coloring of topaz in the WWR-K reactor

Nowadays, radiation technologies are widely used in industry, medicine and other fields. One of the particular cases of application of such technologies is the irradiation-induced coloring of topaz. As a result of the application of this technology, colorless topaz acquires a more noble, respectively, economically advantageous color. For this, different types of radiation can be used. In the case of irradiation-induced coloring of topaz using neutrons, it is necessary to formation optimal conditions for irradiation of topaz. First of all, in the topaz irradiation zone it is necessary to formation a “hard” neutron spectrum not only for the formation of color centers, but also to reduce the residual radioactivity in the topaz. In this work, the possibility of implementing the technology of irradiation-induced coloring of topaz in the WWR-K research reactor was evaluated. For this, the energy distribution of neutrons in the central and peripheral irradiation positions of the WWR-K reactor was determined. On the basis of the obtained values, the time to reach the target neutron fluence ( $10^{18}$  cm<sup>-2</sup>) was estimated. The influence of the ratio of the flux of fast to thermal neutrons on the activation of natural impurities in topaz is shown. The results of trial irradiation of topazes in the WWR-K reactor without formation special conditions are presented. Ways to optimize the conditions for irradiation of topazes in the WWR-K reactor in order to improve the economic efficiency of the work were proposed.

**Key words:** WWR-K reactor, topaz, irradiation position, neutron fluence, optimization, neutron flux, neutron energy spectrum, radiation technologies.

М.Т. Айткулов\*, Д.С. Дюсамбаев, А.М. Аханов, К.С. Киселев, Ж.Т. Бұғыбай,  
Н.К. Романова, Ш.Х. Гизатулин, А.А. Шаймерденов, Д.А. Накипов

Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

\*e-mail: maitkulov@inp.kz

### ССР-Қ реакторында топаздардың түсін радиация арқылы өзгерту мүмкіндігін талдау

Қазіргі таңда радиациялық технологиялар өнеркәсіп пен медицинада және басқа да салаларда өте кеңінен қолданылуда. Жартылай асыл топаздарды радиация арқылы түсін өзгерту осындай технологияларды пайдаланудың жеке бір көрінісі болып табылады. Аталған технологияны қолдану нәтижесінде түссіз топаздар асыл түске енеді, ол экономикалық көзқарастан тиімді болып табылады. Ол үшін әртүрлі радиациялық сәулелерді қолдануға болады. Топаздардың радиация арқылы түсін өзгертуге нейтрондарды пайдаланған жағдайда, оларды сәулелендіру үшін оңтайлы шарттар жасау керек. Топаздарды сәулелендіру аймағында «қатты» спектр болуы керек. Ол түс өзгерту орталықтарын қалыптастыруға ғана емес, сондай-ақ олардағы қалдықты радиобелсенділікті төмендету үшін де қажет. Аталған жұмыста Қазақстан Республикасы Ядролық физика институтының ССР-Қ зерттеу реакторында топаздарды радиация арқылы түсін өзгерту технологиясын іске асыру мүмкіндігі бағаланды. Ол үшін ССР-Қ реакторының орталық және шеткі сәулелендіру каналдарындағы нейтрондардың энергетикалық таралуы анықталды. Осы деректердің негізінде нейтрондардың мақсатты флюенсіне ( $10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) қол жеткізу уақыты бағаланды. Топаздардағы қоспалардың радиобелсенділікке ие болуына жылы нейтрондар ағыны тығыздығының әсері көрсетілді. ССР-Қ реакторының стандартты сәулелендіру каналында топаздарды сынама сәулелендіруінің нәтижелері келтірілген. Жұмыстардың экономикалық тиімділігін жақсарту мақсатында ССР-Қ реакторында топаздарды сәулелендіру шарттарын оңтайландыру жолдары ұсынылды.

**Түйін сөздер:** ССР-Қ реакторы, топаз, сәулелендіру каналы, нейтрондар флюенсі, оңтайландыру, нейтрондар ағынының тығыздығы, нейтрондардың энергетикалық спектрі, радиациялық технологиялар.

### Введение

Топаз – это полудрагоценный камень из группы островных силикатов алюминия. Цветовая гамма топаза разнообразна, однако в природе чаще встречаются бесцветные. Окраска большинства природных топазов связана с радиационными дефектами в структуре кристаллической решетки камня, но таких дефектов можно добиться и искусственным путём. Одним из методов изменения окраски топазов является радиационное окрашивание. В отличие от других методов, радиационное окрашивание выгодно отличается насыщенностью получаемого цвета, но при этом имеет и специфические недостатки. Радиационное окрашивание можно осуществить с помощью электронов, гамма-лучей и нейтронов [1-5]. Однако, самым эффективным методом является нейтронная окраска топазов, так как для окрашивания необходимы высокая проникающая способность частиц и однородность окрашивания топазов. При этом получается красивый голубой или синий оттенок. Недостатком

этого метода является остаточная радиоактивность топазов, вызванная активацией примесей тепловыми нейтронами. Большинство действующих исследовательских реакторов имеют тепловой спектр нейтронов, поэтому для реализации метода радиационного окрашивания топазов на таких реакторах необходимо создать условия облучения, при которых данный метод будет эффективным [6-8].

### Материалы и методы

Анализ проводился для природных топазов, которые имеют химическую формулу –  $\text{Al}_2(\text{F,OH})_2 \text{SiO}_4$ . Нейтронное облучение рассматривалось для облучательных позиций в центре и на периферии активной зоны исследовательского реактора ВВР-К. Реактор ВВР-К – это многоцелевой исследовательский реактор бакового типа с легководным замедлителем и теплоносителем, а также бериллиевым отражателем. Одной из главных особенностей реактора является большое количество облучательных каналов.

Эксплуатация реактора была начата в 1967 году и использовалось топливо с обогащением 36% по урану-235. С 2016 года реактор работает на низкообогащенном урановом топливе (<20% по U-235). Эксплуатация реактора осуществляется циклами. Длительность каждого цикла составляет 21 день. Область применения реактора широкая, начиная от производства радиоизотопов для медицины и промышленности и заканчивая проведением исследований конструктивных и функциональных материалов ядерных и термоядерных реакторов. Реактор снабжен дополнительными оборудованием и установками, которые расширяют его экспериментальные возможности: установка по исследованию газовой деления из материалов ядерных и термоядерных реакторов, «горячие» камеры, газо-вакуумная петлевая установка, критический стенд, установка нейтронной радиографии и томографии, пневмо- и гидропочты и т.д. [9-11].

Нейтронно-физические расчеты проводились методом Монте-Карло с применением транспортного кода MCNP6 [12]. В расчетах использовалась библиотека ядерных констант ENDF/B-VII.1 [13]. Активная зона описана как гетерогенная среда. Статистическая погрешность расчетов не превышает 5%.

Радионуклидный анализ проводился коаксиальным, широкодиапазонным (от 3 кэВ до 3 МэВ), германиевым, полупроводниковым детектором Canberra GX 2518, обладающим высоким разрешением. Относительная эффективность детектора составляет 25%.

## Результаты и обсуждение

Проблема наведенной активности является одной из основных, которая возникает в процессе радиационного окрашивания топазов нейтронами в ядерном реакторе. Обычно весь облучательный процесс строится, исходя из решения данной проблемы. Например, транспортировка облученного материала разрешается, если его удельная активность не превышает 74 Бк/г [14-15]. Для достижения этой величины обычно требуется определенное время выдержки, которое и является одним из критериев эффективности облучательного процесса.

В зависимости от места добычи топазов могут варьироваться основные примеси и, как следствие, активируемые во время их облучения радиоизотопы. Список основных радиоизотопов с относительно большим периодом полураспада приведен в таблице 1 [16-19].

Таблица 1 – Основные радиоизотопы в облученном топазе

Изотоп	$T_{1/2}$ , д	Реакция активации
Ta-182	115	$^{181}\text{Ta}(n,\gamma)^{182}\text{Ta}$
Cs-134	752	$^{133}\text{Cs}(n,\gamma)^{134}\text{Cs}$
Fe-59	44,5	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$
Mn-54	312	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
Sc-46	83,3	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$

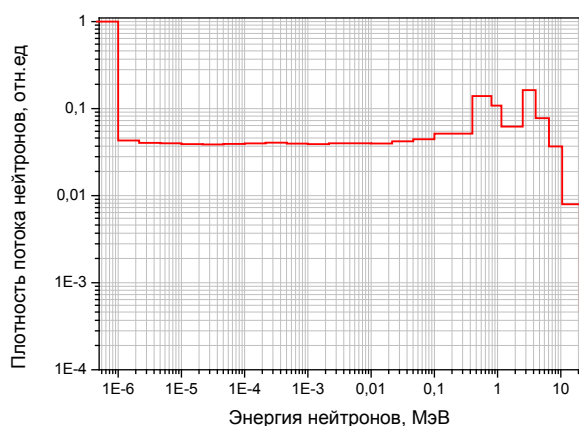
Следует отметить, что в таблице 1 приведен далеко не полный список радиоизотопов, которые активируются в результате облучения нейтронами топазов. Есть и короткоживущие радиоизотопы, не вносящие существенного вклада в наведенную радиоактивность.

Большой период полураспада активированных изотопов приведет к увеличению времени оборота камней, так как потребуются время для их отстоя. Решение этой проблемы может быть найдено путем разработки конструкции облучательной капсулы с отсечением тепловых нейтронов.

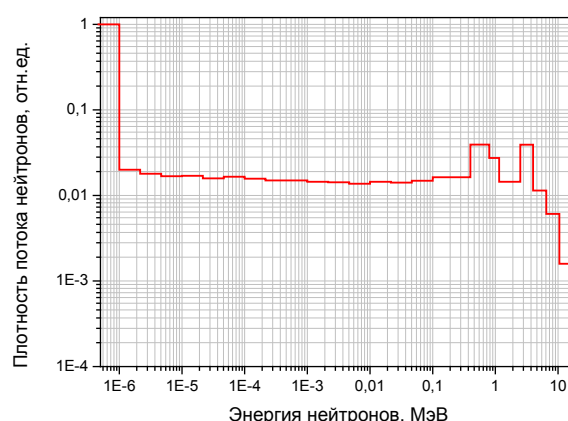
Перед проектированием облучательной капсулы необходимо исследовать радиационные характеристики (энергетическое распределение нейтронов) в облучательной позиции реактора. Определение потока и энергетического спектра нейтронов важно, также, для оценки возможности радиационного окрашивания топазов. Такие данные позволят определить время облучения топазов и возможность практической реализации. В таблице 2 приведены расчетные значения плотности потока тепловых и быстрых нейтронов для разных облучательных позиций активной зоны реактора ВВР-К. Энергетический спектр нейтронов в этих позициях показан на рисунках 1 и 2. Данные, приведенные в таблице 2 и на рисунках 1 и 2, соответствуют центральной плоскости активной зоны.

Таблица 2 – Плотность потока нейтронов в центре и на периферии активной зоны реактора ВВР-К

Расположение канала	Плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	
	$E_n < 0,625 \text{ эВ}$	$E_n > 1,15 \text{ МэВ}$
Центр	$1,7 \cdot 10^{14}$	$4,6 \cdot 10^{13}$
Периферия	$8,5 \cdot 10^{13}$	$4,4 \cdot 10^{12}$



**Рисунок 1** – Спектр нейтронов в центре активной зоны реактора ВВР-К



**Рисунок 2** – Спектр нейтронов на периферии активной зоны реактора ВВР-К

Из приведенного спектра нейтронов наибольший интерес вызывают две энергетические области: тепловая и быстрая. Интенсивность быстрых нейтронов важна для радиационного окрашивания топазов так как формирования дефектов в них происходит при взаимодействии с высокоэнергетичными нейтронами (выше 1 МэВ). Для приобретения топазом необходимого оттенка требуется достижение флюенса быстрых нейтронов в диапазоне  $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . От флюенса быстрых нейтронов зависит цветовая окраска топазов [20-22].

На основании значений плотности потока быстрых нейтронов, приведенных в таблице 2 произведена оценка времени набора целевого флюенса для центральной и периферийной облучательной позиции активной зоны реактора ВВР-К. Результаты приведены в таблице 3.

**Таблица 3** – Время набора целевого флюенса

Расположение канала	Поток быстрых нейтронов $E_n > 1 \text{ МэВ}$	Время облучения топазов для достижения флюенса $\sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-2}$ , ч
Центр активной зоны	$4,6 \cdot 10^{13}$	0,6 – 6,0
Периферия активной зоны	$4,4 \cdot 10^{12}$	6,3 – 63

В реакторе ВВР-К было проведено пробное облучение топазов в существующих условиях (т.е. без отсечения тепловых нейтронов), а затем был проанализирован их радионуклидный состав. В таблице 4 приведены основные активированные радионуклиды с большим периодом полураспада.

**Таблица 4** – Зависимость удельной активности некоторых изотопов от времени

Время (д)	Суммарная удельная активность, Бк/г	Удельная активность, Бк/г				
		Sc-46 $T_{1/2}=83 \text{ д}$	Cs-134 $T_{1/2}=754 \text{ д}$	Ta-182 $T_{1/2}=114 \text{ д}$	Fe-59 $T_{1/2}=45 \text{ д}$	Mn-54 $T_{1/2}=312 \text{ д}$
0	3845	744,1	4,0	3059,9	3,3	33,6
60	2617	453,0	3,8	2129,6	1,3	29,4
120	1788	275,8	3,6	1482,1	0,5	25,7
180	1226	167,9	3,4	1031,5	0,2	22,5
240	843	102,2	3,2	717,9	0,1	19,7
300	582	62,2	3,1	499,6	0,0	17,3
360	404	37,9	2,9	347,7	0,0	15,1
420	281	23,1	2,7	242,0	0,0	13,2

Продолжение таблицы

Время (д)	Суммарная удельная активность, Бк/г	Удельная активность, Бк/г				
		Sc-46 $T_{1/2}=83$ д	Cs-134 $T_{1/2}=754$ д	Ta-182 $T_{1/2}=114$ д	Fe-59 $T_{1/2}=45$ д	Mn-54 $T_{1/2}=312$ д
480	197	14,0	2,6	168,4	0,0	11,6
540	138	8,5	2,4	117,2	0,0	10,1
600	98	5,2	2,3	81,6	0,0	8,9
660	70	3,2	2,2	56,8	0,0	7,8
720	50	1,9	2,1	39,5	0,0	6,8

Из таблицы 4 видно, что основной вклад в наведенную активность вносят Ta-182 и Sc-46, так как они имеют очень большое сечение в тепловой области спектра (см. рис. 3 и 4) [23-24]. Их удельная активность превышает 3000 и 700 Бк/г, соответственно. Время выдержки до снижения суммарной удельной активности 74 Бк/г

составит 660 дней. Исходя из этого, разработка облучательного устройства с отсечением тепловых нейтронов является востребованным и актуальным. Для этого можно использовать уже апробированные методы отсечения тепловых нейтронов с применением экранов их бора, карбида бора или кадмия [25-28].

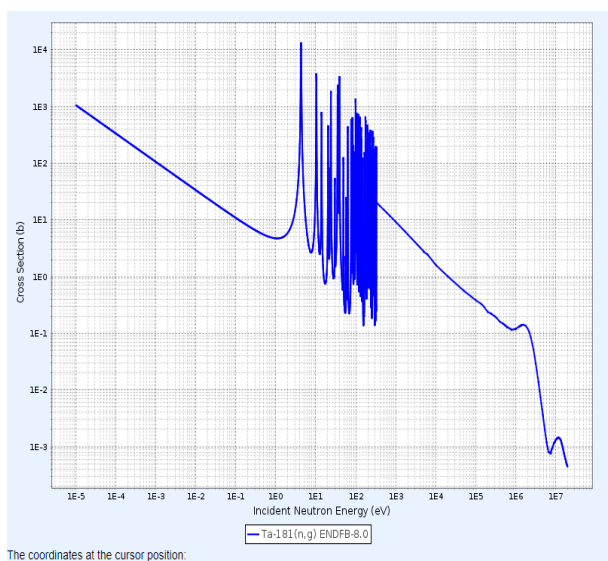


Рисунок 3 – Сечение активации Ta-181

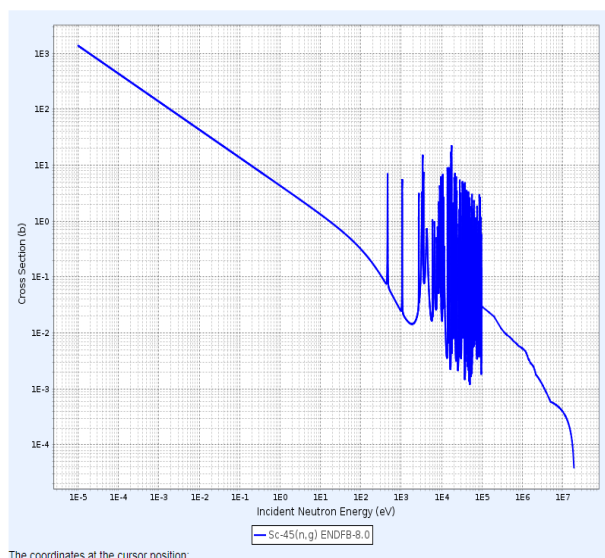


Рисунок 4 – Сечение активации Sc-45

### Выводы

Проведенные исследования показали, что на реакторе ВВР-К возможно облучение топазов с достижением требуемых целевых флюенсов нейтронов. Однако, в виду того, что спектр реактора ВВР-К является преимущественно тепловым, то он приводит к большой наведённой активности топазов, что в свою очередь увеличивает время их выдержки после облучения. Из-за этого облучение топазов в текущих условиях является не эффективным, поэтому

необходимо разработать облучательное устройство, которое позволит создать необходимые условия облучения, в частности, сделать энергетический спектр нейтронов более «жестким».

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан, в рамках программы №BR10965174.

### Литература

- 1 Raju K.S., Topaz-on neutron irradiation // The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. – 1981. – Vol. 32. – P. 929-930.
- 2 Krambrock K. et al. Color centers in topaz: comparison between neutron and gamma irradiation // Phys. Chem. Miner. – 2007. – Vol. 34. – P. 437-444.
- 3 Maneewong A. et al. The Impact of Electron Beam Irradiation in Topaz Quality Enhancement // Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – Vol. 1285.012022
- 4 Mironova-Ulmane N., Skvortsova V. and Popov A.I. Optical absorption and luminescence studies of fast neutron-irradiated complex oxides for jewellery applications // Low Temperature Physics. – 2016. – Vol. 42. – P. 743-747.
- 5 Ittipongse A. et al. The characteristics of electron irradiated topaz: UV-Vis, EPR, and Mid-IR spectroscopic analyses // Materials today: proceedings. – 2018. – Vol. 5. – P. 15092-15097.
- 6 Nassau K. Altering the Color of Topaz // GEMS&GEMOLOGY. – 1985. – Vol. 21, №1. – P. 26–30.
- 7 Helal A.I., Zahran N.F., Goma M.A.M. and Salama S., Irradiated Topaz In The Reactor // Proc. Of the VIII Radiation Physics&Protection Conference (Egypt 12-15 November, 2006), p. 447-451.
- 8 Baitelesov, S.A., Ibragimova, E.M., Kungurov, F.R. and Salikhbaev U.S. Effect of the VVR-SM neutron spectrum on the radioactivity and color of natural topazes // Atomic Energy. –2011. – Vol. 109, №5. – P. 355-361.
- 9 Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Chakrov P.V. and Kenzhin Ye.A. The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor // Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – Vol. 81, №10. – P. 1408–1411.
- 10 Аринкин Ф.М., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Колточник С.Н., Чаков П.В., Чекушина Л.В. Конверсия активной зоны исследовательского реактора ВВР-К // Атомная энергия. – 2017, №1. – С. 15-20.
- 11 Sairanbayev, D.S., Koltchnik, S.N., Shaimerdenov, A.A., Tulegenov, M.S., Kenzhin, Y.A. and Tsuchiya K. Time History of Performance Parameters of WWR-K Reactor during Gradual Replacement of the Water Reflector by a Beryllium One // Russian Physics Journal. –2021. –Vol. 63, №12. P. 2165-2177.
- 12 Goorley J.T., et al., 2013. Initial MCNP6 Release Overview – MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934.
- 13 Chadwick M.B., et al., ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data // Nuclear Data Sheets. – 2011. – Vol. 148. – P. 2887-2996.
- 14 Boonsook K., Kaewwiset W., Limsuwan P. and Naemchanthara K. Gamma ray evaluation of fast neutron irradiated on topaz from Sri Lanka by HPGe gamma ray spectrometry // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 901 P.012145.
- 15 Maneewong, A., Channuie, J., Pangza, K., Jangsawang, N., Charoennam, T. and Chokesiriwiriyakul T. Validation of <sup>182</sup>Ta, <sup>54</sup>Mn and <sup>46</sup>Sc Radioactivity Measurements in Blue Topaz Using Gamma Spectrometric Analysis // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 860. 012016.
- 16 Guo Y.C., Liu X.L. and Huang J.Z. Radioactivity and decay pattern of topaz colored by neutron radiation // China Occupational Medicine. – 2000. – Vol. 27, № 2. – P. 19-21.
- 17 Crowningshield R. (1981) Irradiated topaz and radioactivity // G&G. –1981. –Vol. 17, № 4. P. 215–217.
- 18 Nisakorn N., et al. Radiation Dose Evaluation of Colorless Topaz by TL and ESR Spectroscopy // Applied Mechanics and Materials. – 2017. – Vol. 866. – P. 267-271.
- 19 Wang Ying and Gu yong-bao., Research on radiation-induced color change of white topaz // Radiation Physics and Chemistry. – 2002. – Vol. 63. – P. 223-225.
- 20 The Applications of Research Reactors // IAEA-TECDOC 1234, Vienna 2001, – P. 26.
- 21 Rossman G. Color in Gems: The New Technologies // G&G. – 1981. – Vol. 17. – P. 60-72.
- 22 Leal A., Krambrock K., Ribeiro L., Menezes M., Vermaercke P. and Sneyers L. Study of neutron irradiation-induced colors in Brazilian topaz // Nuclear Instruments and Methods in Physics research A. – 2007. – Vol. 580. – P. 423-426.
- 23 Koning A.J. and Rochman D., Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System // Nuclear Data Sheets. – 2012. – Vol. 113, №12. – P. 2841-2934.
- 24 Brown D.A., et al. ENDF/B-VIII.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data // Nuclear Data Sheets. – 2018. – Vol. 148. – P. 1-142.
- 25 Zhang J., et al. The Radioactive Decay pattern of blue topaz treated by neutron irradiation // G&G. – 2011. – Vol. 47, № 4. – P. 302-307.
- 26 Ashbaugh C.A. Gemstone irradiation and radioactivity // G&G. – 1988. – Vol. 24, №4. –P. 196-213.
- 27 Mi, X. et al., Design of in-pile topaz color-alteration device // Qiangjiguang Yu Lizishu/High Power Laser and Particle Beams. – 2019. – Vol. 31, №1.
- 28 Mohamed N.M.A., Gaheen M.A., Design of fast neutron channels for topaz irradiation // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – Vol. 310. – P. 429-437.

### References

- 1 K.S. Raju, The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 32, 929-930 (1981).
- 2 K. Krambrock, et al. Color centers in topaz: comparison between neutron and gamma irradiation 34, 437-444 (2007).
- 3 A. Maneewong et al., Journal of Physics: Conf. Series. 1285, 012022 (2019).
- 4 N. Mironova-Ulmane, V. Skvortsova, and A. I. Popov, Low Temperature Physics, 42, 743-747 (2016).
- 5 A. Ittipongse, et al., Materialstoday:proceedings, 5, 15092-15097 (2018).

- 6 K. Nassau, G&G, 21 (1), 26–30 (1985).
- 7 A.I. Helal, N.F. Zahran, M.A.M. Goma and Salama S., Physics & Protection Conference, Beni Suef – Fayoum, Egypt, November 13–15, 447 (2006).
- 8 S.A. Baitelesov, E.M. Ibragimova, F.R. Kungurov, and U.S. Salikhbaev, Atomic Energy, 109 (5), 355-361 (2011).
- 9 A.A. Shaimerdenov, D.A. Nakipov, F.M. Arinkin, Sh. Kh. Gizatuln, P.V. Chakrov and Ye.A. Kenzhin, Physics of Atomic Nuclei, 81 (10), 1408–1411 (2018).
- 10 F.M. Arinkin, A.A. Shaimerdenov, Sh.Kh. Gizatuln, D.S. Dyussambayev, S.N. Koltochnik, P.V. Chakrov and L.V. Chekushina, Atomnaya energiya, 1, 15-20 (2017). (in Russ)
- 11 D.S. Sairanbayev, S.N. Koltochnik, A.A. Shaimerdenov, M.S. Tulegenov, Ye. A. Kenzhin and K. Tsuchiya, Russian Physics Journal, 63 (12), 2165-2177 (2021).
- 12 J.T. Goorley, et al., 2013. Initial MCNP6 Release Overview – MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934.
- 13 M.B. Chadwick, et al., Nuclear Data Sheets, 112 (12), 2887–2996 (2011).
- 14 K. Boonsook, W. Kaewwiset, P. Limsuwan and K. Naemchanthara, Journal of Physics: Conference Series, 901, 012145 (2017).
- 15 A. Maneewong, J. Channuie, K. Pangza, N. Jangsawang, T. Charoennam, and T. Chokesiriwiriyakul, Journal of Physics: Conference Series, 860, 012016 (2017).
- 16 Y.C. Guo, X.L. Liu and J.Z. Huang, China Occupational Medicine, 27(2), 19-21 (2000).
- 17 Crowningshield R., G&G, 17(4), 215–217 (1981).
- 18 N. Nisakorn, et al., Applied Mechanics and Materials, 866, 267-271 (2017).
- 19 Wang Ying and Gu yong-bao, Radiation Physics and Chemistry, 63, 223-225 (2002).
- 20 The Applications of Research Reactors, IAEA-TECDOC1234, 26 (2001).
- 21 G. Rossman, G&G, 17, 60-72 (1981).
- 22 A. Leal, K. Krambrock, L. Ribeiro, M. Menezes, P. Vermaercke and L. Sneyers, Nuclear Instruments and Methods in Physics research A, 580, 423-426 (2007).
- 23 A.J. Koning and D. Rochman, Nuclear Data Sheets, 113 (12), 2841-2934 (2012).
- 24 D.A. Brown, et al., Nuclear Data Sheets, 148, 1-142 (2018).
- 25 Zhang J., et al., G&G, 47(4), 302-307 (2011).
- 26 C.A. Ashbaugh G&G, 24(4), 196-213 (1988).
- 27 X. Mi, et al., Qiangjiguang Yu Lizishu/High Power Laser and Particle Beams, 31, 1 (2019).
- 28 N.M.A. Mohamed and M.A. Gaheen, Nuclear Engineering and Design, 310, 429-437 (2016).