

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-448-455

УДК 54.057

## Полимерно-солевой синтез и исследование структуры нанопорошков модифицированного ванадием алюмоиттриевого граната

Сергей Константинович Евстропьев<sup>1</sup>, Вячеслав Александрович Островский<sup>2</sup>,  
Константин Николаевич Макаров<sup>3</sup>, Дмитрий Владимирович Булыга<sup>4</sup>✉,  
Валерий Михайлович Волынкин<sup>5</sup>, Александр Витальевич Сандуленко<sup>6</sup>,  
Константин Владимирович Дукельский<sup>7</sup>, Григорий Сергеевич Полищук<sup>8</sup>

<sup>1,4,5,6,7,8</sup> АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

<sup>2,3</sup> АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, 108840, Российская Федерация

<sup>1</sup> [evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

<sup>2</sup> [ostrovskiy@triniti.ru](mailto:ostrovskiy@triniti.ru), <https://orcid.org/0009-0000-9114-2116>

<sup>3</sup> [makarov@triniti.ru](mailto:makarov@triniti.ru), <https://orcid.org/0009-0004-3280-3489>

<sup>4</sup> [dmbulyga@yandex.ru](mailto:dmbulyga@yandex.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>

<sup>5</sup> [vvolyнкиn@yandex.ru](mailto:vvolyнкиn@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6325-1507>

<sup>6</sup> [al\\_sand@mail.ru](mailto:al_sand@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4688-4767>

<sup>7</sup> [kdukel@mail.ru](mailto:kdukel@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>

<sup>8</sup> [g.polishchuk@optrotech.ru](mailto:g.polishchuk@optrotech.ru), <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>

### Аннотация

**Введение.** В работе низкотемпературным полимерно-солевым методом синтезированы дисперсные порошки алюмоиттриевого граната (АИГ), модифицированного ванадием (V) и проведено сопоставление их структуры с монокристаллами, выращенными традиционными высокотемпературными методами. **Метод.** Структура, морфология и химический состав материалов исследованы методами рентгенофазового, электронно-микроскопического и энергодисперсионного анализов. На основании данных рентгенофазового анализа выполнены расчеты параметров элементарных ячеек кристаллов АИГ в полученных порошках и монокристаллах и оценка среднего размера кристаллов в порошках. Результаты исследований структуры полученных порошков сопоставлены с данными монокристаллов АИГ:V, выращенных высокотемпературными методами. **Основные результаты.** Показано, что дисперсные порошки, полученные во время термообработки при 1000 °С в ходе синтеза, состоят из микроскопических агрегатов нанокристаллов АИГ:V, имеющих средний размер 43 нм и кристаллическую структуру, характерную для монокристаллов АИГ. Установлено, что вхождение ионов ванадия в структуру кристаллов АИГ и замещение ими ионов Al<sup>3+</sup> сопровождается деформацией элементарной ячейки. Показано, что это явление наблюдается как в монокристаллах АИГ:V, выращенных высокотемпературным методом, так и в дисперсных порошках, изготовленных низкотемпературным полимерно-солевым синтезом. Экспериментальные результаты, полученные методом инфракрасной спектроскопии, показали близость структуры нанопорошков и монокристаллов АИГ:V. **Обсуждение.** Синтезированные дисперсные порошки могут быть использованы для создания светопоглощающей оптической керамики или органо-неорганических композитов.

### Ключевые слова

алюмоиттриевый гранат, ванадий, кристалл, элементарная ячейка, нанопорошок

**Ссылка для цитирования:** Евстропьев С.К., Островский В.А., Макаров К.Н., Булыга Д.В., Волынкин В.М., Сандуленко А.В., Дукельский К.В., Полищук Г.С. Полимерно-солевой синтез и исследование структуры нанопорошков модифицированного ванадием алюмоиттриевого граната // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 3. С. 448–455. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-448-455

## Polymer-salt synthesis and study on structure of vanadium-doped yttrium-aluminum garnet

Sergey K. Evstropiev<sup>1</sup>, Vyacheslav A. Ostrovskii<sup>2</sup>, Konstantin N. Makarov<sup>3</sup>,  
Dmitry V. Bulyga<sup>4</sup>, Valery M. Volynkin<sup>5</sup>, Alexander V. Sandulenko<sup>6</sup>,  
Konstantin V. Dukelskii<sup>7</sup>, Grigoriy S. Polishchuk<sup>8</sup>

<sup>1,4,5,6,7,8</sup> JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation

<sup>2,3</sup> АО “GNTs RF TRINITI”, Troitsk, 108840, Russian Federation

<sup>1</sup> evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

<sup>2</sup> ostrovskiy@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9114-2116>

<sup>3</sup> makarov@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3280-3489>

<sup>4</sup> dmbulyga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>

<sup>5</sup> vvolynkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6325-1507>

<sup>6</sup> al\_sand@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4688-4767>

<sup>7</sup> kdukel@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>

<sup>8</sup> g.polishchuk@optrotech.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>

### Abstract

Nanoscaled YAG:V powders were synthesized using low-temperature polymer-salt method. A comparison of their structure with monocrystals structure was performed. Structure, morphology and chemical composition of materials were studied using XRD, SEM and energy-dispersive X-ray spectroscopy. Estimation of average sizes of nanocrystals and crystal cell parameters was performed based on XRD data. The results were compared with the results obtained earlier for YAG:V monocrystals. Nanopowders synthesized at 1000 °C consist from microscopic aggregates of YAG:V nanocrystals with average size of 43 nm and crystal structure characteristic for YAG monocrystals. It was found that V<sup>3+</sup> incorporation and their substitution of aluminum ions leads to distortion of crystal cell. It was shown that this phenomenon is observed both in YAG:V monocrystals and nanopowders synthesized using low-temperature polymer-salt method. The infrared spectroscopy data shows the similarity of the monocrystal and nanopowders structure. Obtained powders can be applied for fabrication of light-absorbing optical ceramics and organo-inorganic composites.

### Keywords

yttrium-aluminum garnet, vanadium, crystal, unit cell, nanopowder

**For citation:** Evstropiev S.K., Ostrovskii V.A., Makarov K.N., Bulyga D.V., Volynkin V.M., Sandulenko A.V., Dukelskii K.V., Polishchuk G.S. Polymer-salt synthesis and study on structure of vanadium-doped yttrium-aluminum garnet. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 448–455 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-448-455

### Введение

Алюмоиттриевый гранат (АИГ), модифицированный ванадием (V), применяется в лазерной технике для создания пассивных затворов [1–6]. Для их изготовления часто используются монокристаллы АИГ:V [2, 5], но разработана и оптическая керамика на основе этого материала [2].

Ионы V в кристаллах АИГ могут находиться в различных валентных формах, соотношение между которыми зависит от окислительно-восстановительных условий технологических процессов роста и последующего отжига кристаллов [2]. Эти ионы в тетраэдрической координации замещают в кристаллах АИГ ионы Al<sup>3+</sup> и характеризуются наличием нескольких полос поглощения в видимой и ближней ИК (инфракрасной) областях спектра с максимумами на длинах волн 424, 598, 822, 1098 и 1282 нм [1, 7]. Полосы поглощения при максимумах 1098 и 1282 нм связаны с ионами V<sup>3+</sup>, а 424 нм — с ионами V<sup>4+</sup> в тетраэдрических координациях. Полоса 598 нм является результатом переналожения полос поглощения ионов V<sup>3+</sup> в октаэдрической и V<sup>4+</sup> в тетраэдрической координациях [1].

Для получения монокристаллов АИГ:V применяются традиционные высокотемпературные методы [1, 5]. Вместе с тем для синтеза люминофоров и порошков АИГ используются более простые и экономичные жид-

костные методы [8–13]. Для синтеза наночастиц АИГ часто применяются низкотемпературные методы (соосаждение из растворов [2, 14], золь-гель [11, 12, 15], полимерно-солевой метод [9, 13] и другие).

Полученные низкотемпературными методами нанопорошки АИГ используются в качестве люминофоров [8–10, 12, 16] и для получения оптической керамики [4, 14, 17, 18]. Светопоглощающая керамика на основе АИГ перспективна для применения в мощных лазерных системах [4, 17, 18]. Потому разработка методов получения нанопорошков, содержащих модифицирующие компоненты, является задачей и необходимым этапом разработки светопоглощающей оптической керамики из АИГ.

Цель настоящей работы — разработка методики полимерно-солевого синтеза и исследование структуры нанопорошков модифицированного ванадием АИГ в сопоставлении с аналогичными монокристаллами, выращенными традиционным высокотемпературным методом.

### Материалы и методы

В настоящей работе для синтеза частиц АИГ:V использован жидкостной полимерно-солевой метод, описанный в работе [9]. В качестве исходного материала для синтеза применен водный раствор, содержащий ни-

траты алюминия (2,98 масс.%) и иттрия (2,31 масс.%), ванадат аммония (0,02 масс.%), поливинилпирролидон ( $M = 25\ 000$  г/моль, 2 масс.%) и солянокислый гидразин (0,04 масс.%). Добавка поливинилпирролидона использована для синтеза из растворов наночастиц АИГ, модифицированных редкоземельными ионами [9, 11, 13]. Солянокислый гидразин добавлен в раствор для восстановления ионов V. Раствор был высушен при 70 °С, затем полученный композит подвергнут термообработке при 1000 °С в течение 2 ч. Полученный в результате термообработки материал представлял собой однородный дисперсный порошок зеленоватого оттенка.

Монокристаллы выращены методами Чохральского и вертикальной направленной кристаллизации. Шихта получена из  $Al_2O_3$ ,  $Y_2O_3$  и  $V_2O_5$ , взятых в стехиометрическом соотношении для получения кристалла АИГ, содержащего 1,25 ат.% V.

Исследование структуры, морфологии и химического состава полученного материала проводилось методами рентгенофазового, электронно-микроскопического и энергодисперсионного анализов. Материал содержал 1,25 ат.% V и представлял собой дисперсный порошок, состоящий из частиц микронного размера.

Для исследования кристаллической структуры синтезированного порошка применен метод рентгенофазового анализа, используя дифрактометр Rigaku Ultima IV (Rigaku Corporation). Средний размер  $d$  кристаллов

АИГ:V рассчитан на основании полученных данных по формуле Шеррера.

Морфология и химический состав материалов изучены методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа на микроскопе TESCAN VEGA3, снабженном приставкой Advanced Aztec Energy (Oxford Instruments).

ИК спектры поглощения полученных материалов измерены при помощи фурье-спектрометра Bruker ALPHA.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены результаты рентгенофазового анализа синтезированного порошка и монокристаллических образцов чистого АИГ и АИГ:V. На приведенных рентгенограммах хорошо видны пики, характерные для АИГ. Детальное рассмотрение положения пиков АИГ:V показало, что, по сравнению с чистым АИГ, наблюдаются небольшие сдвиги пиков в сторону меньших значений брэгговского угла, что свидетельствует о некотором расширении элементарной ячейки кристаллов. Данное явление исследовано в работе [2] при сопоставлении структуры монокристаллов АИГ и АИГ:V, выращенных методом Чохральского.

В табл. 1 приведены положения на рентгенограммах полученных материалов наиболее интенсивных пиков АИГ. Для сравнения в таблице приведены стандартные

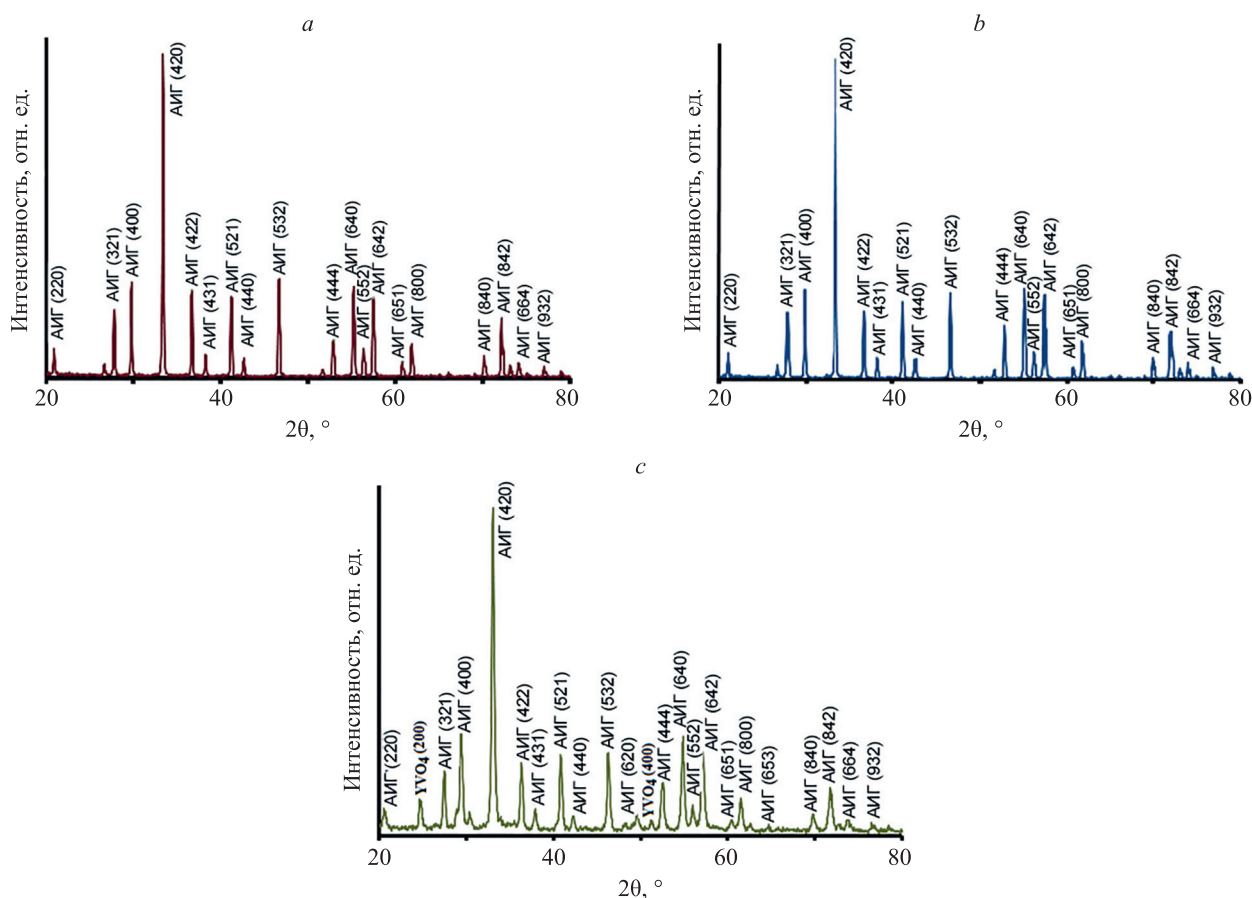


Рис. 1. Рентгенограммы: монокристаллов АИГ (a); АИГ:V (b); порошка АИГ:V, полученного полимерно-солевым методом (c)

Fig. 1. XRD patterns of YAG (a), YAG:V (b) monocrystals and YAG:V powder synthesized by polymer-salt method (c)

Таблица 1. Положение наиболее интенсивных пиков на дифрактограммах материалов и параметры элементарной ячейки кристаллов АИГ

Table 1. Positions of the most intense peaks on XRD patterns and YAG crystal cell parameters

Стандартные параметры материалов		Материал			
		Монокристалл АИГ [20]	Монокристалл АИГ (полученный в настоящей работе)	Монокристалл АИГ:V	Порошок АИГ:V
(hkl)*	JCPDS 01-075-6655	Метод получения материала			
		Чохральского	Вертикальной направленной кристаллизации		Полимерно-солевой
(321)	27,76	27,88	27,90	27,82	27,50
(400)	29,72	29,92	29,84	29,78	29,45
(420)	33,32	33,48	33,45	33,40	33,05
(422)	36,61	36,77	36,75	36,70	36,30
(521)	41,11	41,33	41,25	41,20	40,85
(532)	46,55	46,83	46,70	46,60	46,30
(444)	52,74	52,99	52,90	52,80	52,55
(640)	55,07	55,38	55,20	55,15	54,90
(642)	57,33	57,87	57,46	57,41	57,10
(842)	71,97	72,32	72,10	72,04	71,70
$a^*$ , нм	1,2000	1,1954	1,1989	1,2028	1,2096
$V^*$ , нм <sup>3</sup>	1,7294	1,7082	1,7234	1,7401	1,7698

Примечание. (hkl)\* — обозначения кристаллографических плоскостей (индексы Миллера);  $a^*$  — параметр кристаллической решетки;  $V^*$  — объем кристаллической решетки.

данные о положении этих пиков АИГ (JCPDS 01-075-6655) на дифрактограмме монокристалла АИГ, выращенного методом Чохральского и данные работы [19].

Известно, что вхождение модифицирующих ионов в кристаллическую решетку АИГ часто сопровождается деформацией элементарной ячейки кристаллов [10, 14, 15, 19]. В работе [4] показано, что при внедрении ионов V в кристаллическую решетку АИГ в процессе роста его монокристаллов наблюдается увеличение размеров элементарной ячейки кристаллов. Так, параметр  $a$  кристаллической решетки монокристаллов АИГ, выращенных в [2] методом Чохральского, составил 1,2005 нм, а при введении V (0,8 ат.%) в состав АИГ увеличился до 1,2006 нм. Последующий отжиг в вакууме полученного монокристалла АИГ:V не изменил параметров его элементарной ячейки, а термообработка в среде водорода привела к дополнительному расширению элементарной ячейки кристалла ( $a = 1,2008$  нм).

Изменение параметров элементарной ячейки кристаллов АИГ связано с различием размеров V и замещаемых ими ионов. Ионы V замещают  $Al^{3+}$  в кристаллах АИГ [1, 5]. Ионные радиусы  $Al^{3+}$  (VI),  $V^{4+}$  (VI) и  $V^{3+}$  (VI) составляют 53,5, 58,0 и 64,0 пм, соответственно [20]. Различие в размерах трехвалентных ионов алюминия и V значительно и при вхождении  $V^{3+}$  в кристаллическую решетку АИГ наблюдается ее заметная деформация.

Оценочные расчеты по формуле Шеррера показали, что средний размер кристаллов АИГ:V в синтезирован-

ном порошке составляет 43 нм, что заметно превышает размеры кристаллов АИГ:Yb, полученные аналогичным методом в [13].

На рентгенограмме порошка АИГ:V кроме пиков АИГ наблюдаются также небольшие пики ванадата иттрия  $YVO_4$  с максимумами около 25 и 50° (рис. 1, c).

Их появление на рентгенограмме может быть связано с проявлением дефицита алюминия в полученном порошке и тем, что термообработка материалов в процессе полимерно-солевого синтеза осуществлялась в воздушной атмосфере, что могло способствовать окислению ионов V. Отметим, что заметный дефицит алюминия и избыток иттрия по сравнению с расчетными стехиометрическими соотношениями в монокристаллах и керамике АИГ:V наблюдался в работе [2].

На рис. 2 приведен электронно-микроскопический снимок порошка АИГ:V, полученного полимерно-солевым методом. Видно, что полученный порошок состоит из частиц неправильной формы различного размера. Наряду с субмикронными частицами в структуре материала наблюдаются агрегаты, имеющие микронные размеры.

На рис. 3, a представлены ИК спектры монокристаллов АИГ и АИГ:V, а на рис. 3, b — порошка АИГ:V.

В спектрах наблюдаются интенсивные полосы поглощения с максимумами 511, 566, 694, 725 и 789  $cm^{-1}$ , характерные для кристаллов АИГ [10, 12, 13, 15] и соответствующие колебаниям связей Al–O и Y–O в структурных группах  $[AlO_4]$ ,  $[AlO_6]$  и  $[YO_8]$ . Так, пики с максимумами 511, 566 и 725  $cm^{-1}$  часто относят к

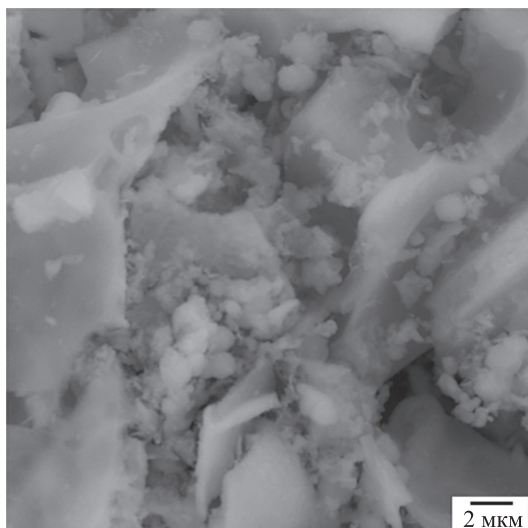


Рис. 2. Электронно-микроскопический снимок порошка АИГ:V, синтезированного полимерно-солевым методом и термообработанного при 1000 °С

Fig. 2. SEM image of YAG:V powder synthesized by polymer-salt method at 1000 °C

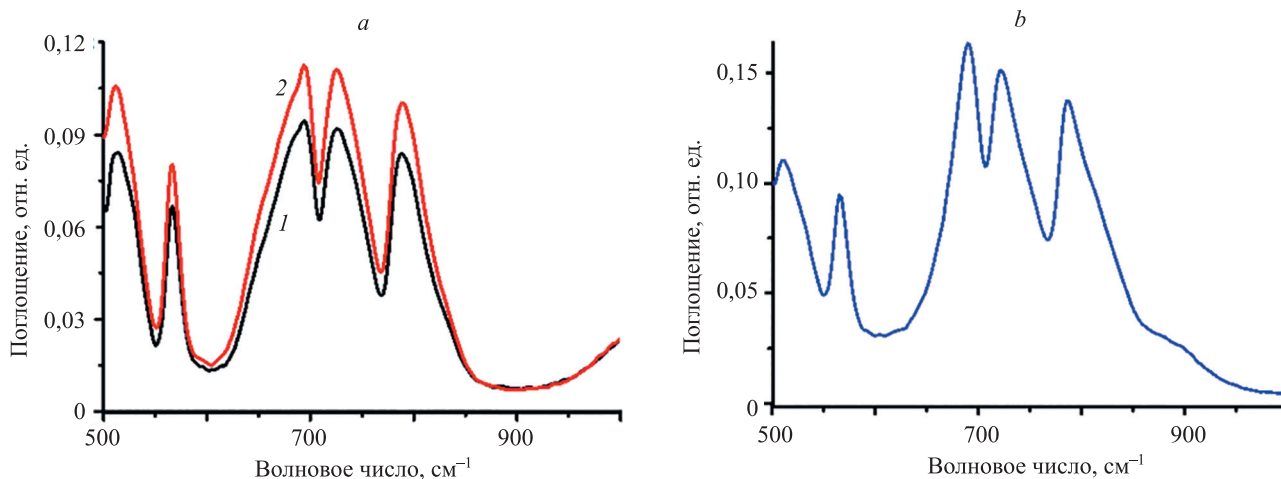


Рис. 3. Инфракрасные спектры поглощения синтезированных материалов: монокристаллов АИГ (кривая 1) и АИГ:V (кривая 2) (a) и порошка АИГ:V (b)

Fig. 3. Infrared absorption spectra of synthesized materials: YAG (curve 1) and YAG:V (curve 2) monocrystals (a); YAG:V powder (b)

колебаниям Y–O связи [16, 21, 22], а полосы с максимумами 694 и 789  $\text{cm}^{-1}$  к колебаниям связи Al–O [16, 19]. Вместе с тем обзор многочисленных научных данных по ИК спектрам кристаллов АИГ, приведенный в работе [16] показывает, что отнесение пиков поглощения к колебаниям конкретных связей может быть неоднозначным.

При сопоставлении спектров монокристалла и порошка АИГ:V заметно различие в соотношении интенсивностей полос поглощения различных структурных групп. Отметим также, что форма спектра поглощения порошка АИГ:V аналогична форме спектра порошков АИГ:Yb, приведенным в [23]. Можно предположить, что наблюдаемое небольшое различие в ИК спектрах поглощения монокристаллов (рис. 3, a) и нанопорошка (рис. 3, b) связано с незавершенностью процессов формирования кристаллической структуры последнего в процессе его низкотемпературного синтеза.

## Заключение

В работе экспериментально показана возможность формирования низкотемпературным (1000 °С) полимерно-солевым методом дисперсного порошка алюмоиттриевого граната, модифицированного ванадием. Полученный порошок состоит из нанокристаллов, имеющих средний размер 43 нм. Результаты сопоставления данных рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии монокристаллов алюмоиттриевого граната, модифицированного ванадием, выращенных методом направленной кристаллизации и полученного порошка, показали схожесть кристаллической структуры этих материалов. На основании данных рентгенофазового анализа показано, что при вхождении ионов ванадия в структуру алюмоиттриевого граната и замещении ими ионов алюминия происходит некоторое увеличение размеров элементарной ячейки кристалла.

Это явление наблюдается как в монокристаллах, так и в порошке, полученном низкотемпературным синтезом. На основании полученных результатов можно сделать

вывод о перспективности полимерно-солевого метода для синтеза нанопорошков для светопоглощающей оптической керамики.

### Литература

- Laguta V., Buryi M., Beitelrova A., Laguta O., Nejezchleb K., Nikl M. Vanadium in yttrium aluminum garnet: charge states and localization in the lattice // *Optical Materials*. 2019. V. 91. P. 228–234. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.03.024>
- Kruczek M., Talik E., Kusz J., Sakowska H., Świrkowicz M., Weglarz H. Electronic structure of  $Y_3Al_5O_{12}:V$  single crystals, comparison with sintered ceramics // *Acta Physica Polonica A*. 2009. V. 115. N 1. P. 209–212. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.115.209>
- Sulc J., Jelinkova H., Nemeč M., Nejezchleb K., Skoda V. V:YAG saturable absorber for flash-lamp and diode-pumped solid state lasers // *Proceedings of SPIE*. 2004. V. 5460. <https://doi.org/10.1117/12.544822>
- Huang H.-T., Zhang B.-T., He J.-L., Yang J.-F., Xu J.-L., Yang X.-Q., Zuo C.-H., Zhao S. Diode-pumped passively Q-switched Nd:Gd<sub>0.5</sub>Y<sub>0.5</sub>VO<sub>4</sub> laser at 1.34  $\mu\text{m}$  with V<sup>3+</sup>:YAG as the saturable absorber // *Optics Express*. 2009. V. 17. N 9. P. 6946–6951. <https://doi.org/10.1364/OE.17.006946>
- Mikhailov V.P., Kuleshov N.V., Zhavoronkov N.I., Prokohsin P.V., Yumashev K.V., Sandulenko V.A. Optical absorption and nonlinear transmission of tetrahedral V<sup>3+</sup> (d<sup>2</sup>) in yttrium aluminum garnet // *Optical Materials*. 1993. V. 2. N 4. P. 267–272. [https://doi.org/10.1016/0925-3467\(93\)90023-T](https://doi.org/10.1016/0925-3467(93)90023-T)
- Huang H.-T., He J.-L., Zhang B.-T., Yang J.-F., Xu J.-L., Zuo C.-H., Tao X.-T. V<sup>3+</sup>:YAG as the saturable absorber for a diode-pumped quasi-three-level dual-wavelength Nd:GGG laser // *Optics Express*. 2010. V. 18. N 4. P. 3352–3357. <https://doi.org/10.1364/OE.18.003352>
- Weber M.J., Riseberg L.A. Optical spectra of vanadium ions in yttrium aluminum garnet // *Journal of Chemical Physics*. 1971. V. 55. N 5. P. 2032–2038. <https://doi.org/10.1063/1.1676370>
- Kim T., Lee J.-K. Template-free synthesis and characterization of spherical Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> (YAG:Ce) nanoparticles // *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2014. V. 35. N 10. P. 2917–2921. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2014.35.10.2917>
- Sokolov I.S., Maslennikov S.Y., Evstropiev S.K., Mironov L.Y., Nikonov N.V., Oreshkina K.V. YAG:Ce<sup>3+</sup> phosphor nanopowders and thin textured coatings prepared by polymer-salt method // *Optical Engineering*. 2019. V. 58. N 2. P. 027103. <https://doi.org/10.1117/1.oe.58.2.027103>
- He X., Liu X., Li R., Yang B., Yu K., Zeng M., Yu R. Effects of local structure of Ce<sup>3+</sup> ions on luminescent properties of Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce nanoparticles // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. P. 22238. <https://doi.org/10.1038/srep22238>
- Муссауи А., Булыга Д.В., Игнатьев А.И., Евстропьев С.К., Никоноров Н.В. Структурные и спектральные свойства нанокристаллических порошков АИГ:Nd, АИГ:Ce и АИГ:Yb, синтезированных модифицированным методом Печини // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2024. № 1. С. 1–10. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-1-10>
- Veith M., Mathur S., Kareiva A., Jilavi M., Zimmer M., Huch V. Low temperature synthesis of nanocrystalline Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YAG) and Ce-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> via different sol-gel methods // *Journal of Materials Chemistry*. 1999. V. 9. N 12. P. 3069–3079. <https://doi.org/10.1039/A903664D>
- Bulyga D.V., Evstropiev S.K. Intermediate products of Yb:YAG laser ceramics fabrication: structural features, morphology, and luminescent properties // *Research on Chemical Intermediates*. 2021. V. 47. N 8. P. 3501–3514. <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04484-w>
- Ma B., Wang B., Zhang W., Wei N., Lu T., He J. Promotion of powder crystallinity and its influence on the properties of Nd:YAG transparent ceramics // *Optical Materials*. 2017. V. 64. P. 384–390. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.01.006>
- Lukowiak A., Wiglusz R.J., Maczka M., Gluchowski P., Strek W. IR and Raman spectroscopy study of YAG nanoceramics // *Chemical Physics Letters*. 2010. V. 494. N 4-6. P. 279–283. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2010.06.033>

### References

- Laguta V., Buryi M., Beitelrova A., Laguta O., Nejezchleb K., Nikl M. Vanadium in yttrium aluminum garnet: charge states and localization in the lattice. *Optical Materials*, 2019, vol. 91, pp. 228–234. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.03.024>
- Kruczek M., Talik E., Kusz J., Sakowska H., Świrkowicz M., Weglarz H. Electronic structure of Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:V single crystals, comparison with sintered ceramics. *Acta Physica Polonica A*, 2009, vol. 115, no. 1, pp. 209–212. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.115.209>
- Sulc J., Jelinkova H., Nemeč M., Nejezchleb K., Skoda V. V:YAG saturable absorber for flash-lamp and diode-pumped solid state lasers. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5460. <https://doi.org/10.1117/12.544822>
- Huang H.-T., Zhang B.-T., He J.-L., Yang J.-F., Xu J.-L., Yang X.-Q., Zuo C.-H., Zhao S. Diode-pumped passively Q-switched Nd:Gd<sub>0.5</sub>Y<sub>0.5</sub>VO<sub>4</sub> laser at 1.34  $\mu\text{m}$  with V<sup>3+</sup>:YAG as the saturable absorber. *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 9, pp. 6946–6951. <https://doi.org/10.1364/OE.17.006946>
- Mikhailov V.P., Kuleshov N.V., Zhavoronkov N.I., Prokohsin P.V., Yumashev K.V., Sandulenko V.A. Optical absorption and nonlinear transmission of tetrahedral V<sup>3+</sup> (d<sup>2</sup>) in yttrium aluminum garnet. *Optical Materials*, 1993, vol. 2, no. 4, pp. 267–272. [https://doi.org/10.1016/0925-3467\(93\)90023-T](https://doi.org/10.1016/0925-3467(93)90023-T)
- Huang H.-T., He J.-L., Zhang B.-T., Yang J.-F., Xu J.-L., Zuo C.-H., Tao X.-T. V<sup>3+</sup>:YAG as the saturable absorber for a diode-pumped quasi-three-level dual-wavelength Nd:GGG laser. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 4, pp. 3352–3357. <https://doi.org/10.1364/OE.18.003352>
- Weber M.J., Riseberg L.A. Optical spectra of vanadium ions in yttrium aluminum garnet. *Journal of Chemical Physics*, 1971, vol. 55, no. 5, pp. 2032–2038. <https://doi.org/10.1063/1.1676370>
- Kim T., Lee J.-K. Template-free synthesis and characterization of spherical Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> (YAG:Ce) nanoparticles. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2014, vol. 35, no. 10, pp. 2917–2921. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2014.35.10.2917>
- Sokolov I.S., Maslennikov S.Y., Evstropiev S.K., Mironov L.Y., Nikonov N.V., Oreshkina K.V. YAG:Ce<sup>3+</sup> phosphor nanopowders and thin textured coatings prepared by polymer-salt method. *Optical Engineering*, 2019, vol. 58, no. 2, pp. 027103. <https://doi.org/10.1117/1.oe.58.2.027103>
- He X., Liu X., Li R., Yang B., Yu K., Zeng M., Yu R. Effects of local structure of Ce<sup>3+</sup> ions on luminescent properties of Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce nanoparticles. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 22238. <https://doi.org/10.1038/srep22238>
- Moussaoui A., Bulyga D.V., Ignatiev A.I., Evstropiev S.K., Nikonov N.V. Structural and spectral properties of YAG:Nd, YAG:Ce and YAG:Yb nanocrystalline powders synthesized via modified Pechini method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 1–10. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-1-10>
- Veith M., Mathur S., Kareiva A., Jilavi M., Zimmer M., Huch V. Low temperature synthesis of nanocrystalline Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YAG) and Ce-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> via different sol-gel methods. *Journal of Materials Chemistry*, 1999, vol. 9, no. 12, pp. 3069–3079. <https://doi.org/10.1039/A903664D>
- Bulyga D.V., Evstropiev S.K. Intermediate products of Yb:YAG laser ceramics fabrication: structural features, morphology, and luminescent properties. *Research on Chemical Intermediates*, 2021, vol. 47, no. 8, pp. 3501–3514. <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04484-w>
- Ma B., Wang B., Zhang W., Wei N., Lu T., He J. Promotion of powder crystallinity and its influence on the properties of Nd:YAG transparent ceramics. *Optical Materials*, 2017, vol. 64, pp. 384–390. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.01.006>
- Lukowiak A., Wiglusz R.J., Maczka M., Gluchowski P., Strek W. IR and Raman spectroscopy study of YAG nanoceramics. *Chemical*

16. Tucureanu V., Matei A., Avram A.M. Synthesis and characterization of YAG:Ce phosphors for white LEDs // *Opto-Electronics Review*. 2015. V. 23. N 4. P. 239–251. <https://doi.org/10.1515/oere-2015-0038>
17. Timoshenko A.D., Doroshenko A.G., Parkhomenko S.V., Vorona I.O., Kryzhanovska O.S., Safronova N.A., Vovk O.O., Tolmachev A.V., Baumer V.N., Matolinová I., Yavetskiy R.P. Effect of the sintering temperature on microstructure and optical properties of reactive sintered YAG:Sm<sup>3+</sup> ceramics // *Optical Materials: X*. 2022. V. 13. P. 100131. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2021.100131>
18. Timoshenko A.D., Matvienko O.O., Doroshenko A.G., Parkhomenko S.V., Vorona I.O., Kryzhanovska O.S., Safronova N.A., Vovk O.O., Tolmachev A.V., Baumer V.N., Matolinová I., Hau S., Georghe C., Yavetskiy R.P. Highly-doped YAG:Sm<sup>3+</sup> transparent ceramics: Effect of Sm<sup>3+</sup> ions concentration // *Ceramics International*. 2023. V. 49. N 5. P. 7524–7533. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.257>
19. Kostić S., Lazarević Z.Ž., Radojević M., Milutinović A., Romčević M., Romčević N.Ž., Valčić A. Study of Structural and optical properties of YAG and Nd:YAG single crystals // *Materials Research Bulletin*. 2015. V. 63. P. 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.11.033>
20. Shennon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // *Acta Crystallography*. 1976. V. A32. P. 751–767. <https://doi.org/10.1107/s0567739476001551>
21. Zhang L., Li Z., Zhen F., Wang L., Zhang Q., Sun R., Selim F.A., Wong C., Chen H. High sinterability nano-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders prepared via decomposition of hydroxyl-carbonate precursors for transparent ceramics // *Journal of Materials Science*. 2017. V. 52. N 14. P. 8556–8567. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1071-0>
22. Gorbachenya K.N., Yasukevich A.S., Kisel V.K., Lopukhin K.V., Balashov V.V., Fedin A.V., Gerke M.N., Volkova E.A., Yapaskurt V.O., Kuzmin N.N., Ksenofontov D.A., Korost D.V., Kuleshov N.V. Synthesis and laser-related spectroscopy of Er:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> optical ceramics as a gain medium for in-band-pumped 1.6 μm lasers // *Crystals*. 2022. V. 12. N 4. P. 519. <https://doi.org/10.3390/cryst12040519>
23. Bulyga D.V., Evstropiev S.K., Sadovnichii R.V., Khodasevich M.A. Influence of isomorphous substitution of Y<sup>3+</sup> ions by Gd<sup>3+</sup> ions on structural and luminescent properties of Yb:YAG nanopowders // *Materials Science and Engineering: B*. 2022. V. 285. P. 115980. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115980>
16. Tucureanu V., Matei A., Avram A.M. Synthesis and characterization of YAG:Ce phosphors for white LEDs // *Opto-Electronics Review*. 2015. V. 23. N 4. P. 239–251. <https://doi.org/10.1515/oere-2015-0038>
17. Timoshenko A.D., Doroshenko A.G., Parkhomenko S.V., Vorona I.O., Kryzhanovska O.S., Safronova N.A., Vovk O.O., Tolmachev A.V., Baumer V.N., Matolinová I., Yavetskiy R.P. Effect of the sintering temperature on microstructure and optical properties of reactive sintered YAG:Sm<sup>3+</sup> ceramics. *Optical Materials: X*, 2022, vol. 13, pp. 100131. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2021.100131>
18. Timoshenko A.D., Matvienko O.O., Doroshenko A.G., Parkhomenko S.V., Vorona I.O., Kryzhanovska O.S., Safronova N.A., Vovk O.O., Tolmachev A.V., Baumer V.N., Matolinová I., Hau S., Georghe C., Yavetskiy R.P. Highly-doped YAG:Sm<sup>3+</sup> transparent ceramics: Effect of Sm<sup>3+</sup> ions concentration. *Ceramics International*, 2023, vol. 49, no. 5, pp. 7524–7533. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.257>
19. Kostić S., Lazarević Z.Ž., Radojević M., Milutinović A., Romčević M., Romčević N.Ž., Valčić A. Study of Structural and optical properties of YAG and Nd:YAG single crystals. *Materials Research Bulletin*, 2015, vol. 63, pp. 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.11.033>
20. Shennon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallography*, 1976, vol. A32, pp. 751–767. <https://doi.org/10.1107/s0567739476001551>
21. Zhang L., Li Z., Zhen F., Wang L., Zhang Q., Sun R., Selim F.A., Wong C., Chen H. High sinterability nano-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders prepared via decomposition of hydroxyl-carbonate precursors for transparent ceramics. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, no. 14, pp. 8556–8567. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1071-0>
22. Gorbachenya K.N., Yasukevich A.S., Kisel V.K., Lopukhin K.V., Balashov V.V., Fedin A.V., Gerke M.N., Volkova E.A., Yapaskurt V.O., Kuzmin N.N., Ksenofontov D.A., Korost D.V., Kuleshov N.V. Synthesis and laser-related spectroscopy of Er:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> optical ceramics as a gain medium for in-band-pumped 1.6 μm lasers. *Crystals*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 519. <https://doi.org/10.3390/cryst12040519>
23. Bulyga D.V., Evstropiev S.K., Sadovnichii R.V., Khodasevich M.A. Influence of isomorphous substitution of Y<sup>3+</sup> ions by Gd<sup>3+</sup> ions on structural and luminescent properties of Yb:YAG nanopowders. *Materials Science and Engineering: B*, 2022, vol. 285, pp. 115980. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115980>

## Авторы

**Евстропьев Сергей Константинович** — доктор химических наук, начальник отдела, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация; [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), [https://orcid.org/0000-0002-0160-8443, evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru)

**Островский Вячеслав Александрович** — начальник лаборатории, АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, 108840, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-9114-2116>, [ostrovskiy@triniti.ru](mailto:ostrovskiy@triniti.ru)

**Макаров Константин Николаевич** — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, 108840, Российская Федерация, [sc 7006042620](https://orcid.org/0009-0004-3280-3489), <https://orcid.org/0009-0004-3280-3489>, [makarov@triniti.ru](mailto:makarov@triniti.ru)

**Бulyга Дмитрий Владимирович** — младший научный сотрудник, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация; аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57217158694](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527), <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>, [dmbulyga@yandex.ru](mailto:dmbulyga@yandex.ru)

**Волынкин Валерий Михайлович** — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 6601999426](https://orcid.org/0000-0002-6325-1507), <https://orcid.org/0000-0002-6325-1507>, [vvolyнкиn@yandex.ru](mailto:vvolyнкиn@yandex.ru)

## Authors

**Sergey K. Evstropiev** — D.Sc. (Chemistry), Head of Department, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation; [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), [https://orcid.org/0000-0002-0160-8443, evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru)

**Vyacheslav A. Ostrovskii** — Head of Laboratory, AO “GNTs RF TRINITI”, Troitsk, 108840, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-9114-2116>, [ostrovskiy@triniti.ru](mailto:ostrovskiy@triniti.ru)

**Konstantin N. Makarov** — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, AO “GNTs RF TRINITI”, Troitsk, 108840, Russian Federation, [sc 7006042620](https://orcid.org/0009-0004-3280-3489), <https://orcid.org/0009-0004-3280-3489>, [makarov@triniti.ru](mailto:makarov@triniti.ru)

**Dmitry V. Bulyga** — Junior Researcher, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 57217158694](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527), <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>, [dmbulyga@yandex.ru](mailto:dmbulyga@yandex.ru)

**Valery M. Volynkin** — PhD (Chemistry), Senior Researcher, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 6601999426](https://orcid.org/0000-0002-6325-1507), <https://orcid.org/0000-0002-6325-1507>, [vvolyнкиn@yandex.ru](mailto:vvolyнкиn@yandex.ru)

**Сандуленко Александр Витальевич** — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 6602795614](https://orcid.org/0000-0002-4688-4767), <https://orcid.org/0000-0002-4688-4767>, [al\\_sand@mail.ru](mailto:al_sand@mail.ru)  
**Дукельский Константин Владимирович** — доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 6602633236](https://orcid.org/0000-0002-1627-7499), <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>, [kdukel@mail.ru](mailto:kdukel@mail.ru)  
**Полищук Григорий Сергеевич** — кандидат технических наук, временный генеральный директор, АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 25926044900](https://orcid.org/0009-0005-9358-6040), <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>, [g.polishchuk@optrotech.ru](mailto:g.polishchuk@optrotech.ru)

**Alexander V. Sandulenko** — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 6602795614](https://orcid.org/0000-0002-4688-4767), <https://orcid.org/0000-0002-4688-4767>, [al\\_sand@mail.ru](mailto:al_sand@mail.ru)  
**Konstantin V. Dukelskii** — D.Sc., Associate Professor, Deputy General Director, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 6602633236](https://orcid.org/0000-0002-1627-7499), <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>, [kdukel@mail.ru](mailto:kdukel@mail.ru)  
**Grigoriy S. Polishchuk** — PhD, Acting General Director, JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 25926044900](https://orcid.org/0009-0005-9358-6040), <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>, [g.polishchuk@optrotech.ru](mailto:g.polishchuk@optrotech.ru)

*Статья поступила в редакцию 01.04.2024*  
*Одобрена после рецензирования 24.04.2024*  
*Принята к печати 26.05.2024*

*Received 01.04.2024*  
*Approved after reviewing 24.04.2024*  
*Accepted 26.05.2024*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»