

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

EARTH SCIENCES

УДК 544.478+544.227+615.281.9

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-454-459>

Поступило в редакцию 15.07.2021

Received 15.07.2021

**Е. Б. Чубенко¹, А. В. Баглов¹, О. А. Емельянова², Н. В. Дудчик²,
Е. В. Дроздова², В. Е. Борисенко^{1,3}**

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь

²Научно-практический центр гигиены, Минск, Республика Беларусь

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация

**ФОРМИРОВАНИЕ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА
ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА**

(Представлено академиком В. А. Лабуновым)

Аннотация. Графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) синтезировали путем пиролиза тиокарбамида с последующей полимеризацией его продуктов при 500 °С. После измельчения синтезированного материала из него были приготовлены водные суспензии с концентрацией частиц 100–300 мкг/мл. Антибактериальная активность синтезированного материала в условиях облучения содержащей его суспензии излучением видимого диапазона светодиодного источника в течение 60–120 мин подтверждена на примере *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* и *Pseudomonas aeruginosa*.

Ключевые слова: графитоподобный нитрид углерода, антибактериальная активность, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* и *Pseudomonas aeruginosa*

Для цитирования. Формирование и антибактериальные свойства графитоподобного нитрида углерода / Е. Б. Чубенко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 454–459. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-454-459>

**Eugene B. Chubenko¹, Aleksey V. Baglov¹, Olga A. Emeliyanova², Natalia V. Dudchik²,
Alena V. Drozdova², Victor E. Borisenko^{1,3}**

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

²Scientific Practical Centre of Hygiene, Minsk, Republic of Belarus

³National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russian Federation

FORMATION AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF GRAPHITIC CARBON NITRIDE

(Communicated by Academician Vladimir A. Labunov)

Abstract. Graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) was synthesized by pyrolysis of thiocarbamide and a subsequent polymerization of its products at 500 °C. After grinding the synthesized material, aqueous suspensions with the concentrations of the particles of 100–300 µg/ml were prepared from it. The antibacterial activity of the material under irradiation with the LED’s visible light for 60–120 min was confirmed for *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Pseudomonas aeruginosa*.

Keywords: graphitic carbon nitride, antibacterial activity, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*

For citation. Chubenko E. B., Baglov A. V., Emeliyanova O. A., Dudchik N. V., Drozdova E. V., Borisenko V. E. Formation and antibacterial properties of graphitic carbon nitride. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 454–459 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-454-459>

Введение. Графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) привлекает внимание исследователей сочетанием выраженных фотокаталитических и фотолюминесцентных свойств, перспективных для практического применения [1–4]. Сегодня конкурирующие с ним фотокаталитически активные материалы, такие как диоксид титана и оксид цинка, в наноструктурированном виде

широко применяются для фоторазложения органических загрязнителей воды и воздуха в условиях активации УФ-излучением ближнего диапазона (300–400 нм), что связано с достаточно большой шириной запрещенной зоны в этих полупроводниковых оксидах. Известно, что они демонстрируют и антибактериальную активность в отношении различных патогенных микроорганизмов через повреждение их мембран свободными радикалами, образующимися за счет взаимодействия фотогенерированных носителей заряда в материале с ионами и молекулами жидкой или газовой среды на границе раздела фаз.

Слоистая структура объемного $g\text{-C}_3\text{N}_4$ сходна с графитом, а его отдельные монослои по своей структуре близки к графену. В связи с этим можно ожидать схожего механизма воздействия $g\text{-C}_3\text{N}_4$ на патогенные микроорганизмы, когда антибактериальный эффект достигается как за счет физического, так и химического взаимодействия [5–8]. Непосредственный контакт наночастиц или отдельных монослоев $g\text{-C}_3\text{N}_4$ с мембраной микроорганизма, как и в случае графена, должен приводить к механическому повреждению последней и инактивация вследствие утечки внутриклеточного матрикса. Кроме того, окислительный стресс может повреждать ДНК и вызывать митохондриальную дисфункцию, что приводит к ингибированию размножения и роста бактерий [9; 10]. Однако такого рода антибактериальные свойства $g\text{-C}_3\text{N}_4$ остаются неизученными. В связи с этим целью нашей работы явилось исследование антибактериальной активности $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в отношении кишечной палочки, золотистого стафилококка и синегнойной палочки.

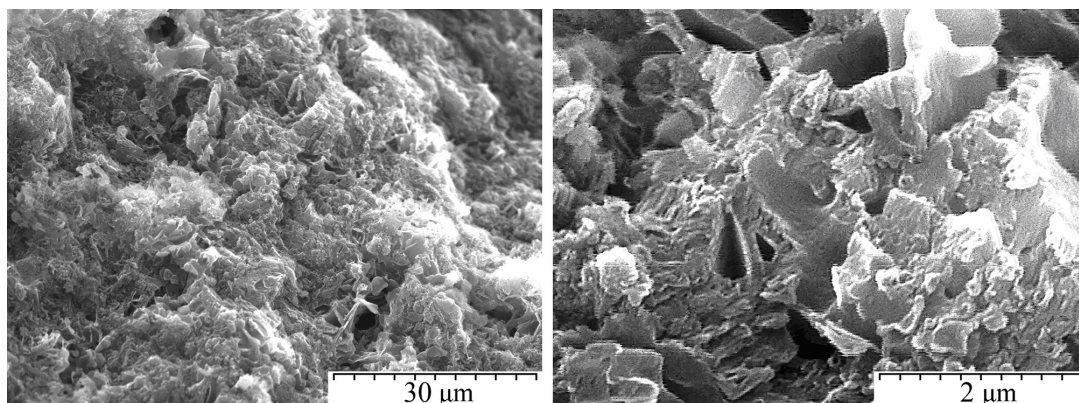
Материалы и методы исследования. Графитоподобный нитрид углерода синтезировали путем пиролизического разложения прекурсора – тиокарбамида, с последующей полимеризацией продуктов разложения в загерметизированном тигле при 500 °С в течение 30 мин, как детально описано в [11]. Исследование полученного материала методами рентгеновской дифракции и инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье подтверждает формирование $g\text{-C}_3\text{N}_4$ [11]. Морфологию полученного материала изучали с помощью растровой электронной микроскопии. Механически измельченный в ступке синтезированный материал смешивали с дистиллированной водой для получения суспензий с концентрациями частиц 25, 50, 100 и 300 мкг/мл. Эти суспензии использовали для оценки антибактериальной активности $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в отношении тест-культур кишечной палочки *Escherichia coli* (*E. coli*), золотистого стафилококка *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) и синегнойной палочки *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*). Выбранные штаммы микроорганизмов являются репрезентативными представителями различных групп микроорганизмов, отличающихся друг от друга по строению клеточной стенки и защитным механизмам. Все исходные тест-штаммы микроорганизмов обладали типичными морфологическими, культуральными и физиолого-биохимическими признаками, а также хорошими ростовыми свойствами.

Модельные эксперименты по оценке антибактериального эффекта проводили модифицированным суспензионным методом¹ [12]. Для этого суспензии из микроорганизмов в физиологическом растворе, предварительно выращенных в питательной среде на основе агара, разливали по 3 мл в стерильные чашки Петри диаметром 40 мм. Затем в часть из них добавляли по 300 мкл водной суспензии с $g\text{-C}_3\text{N}_4$, а в другую часть, выполняющую роль контрольных образцов, добавляли 300 мкл дистиллированной воды. Чашки Петри помещали на платформу перемешивающего устройства Loip LS 220 и устанавливали режим перемешивания 330 об/мин. Перемешивание исследуемых и контрольных суспензий осуществляли как под действием излучения видимого диапазона светодиодной лампы EL-PL10PW мощностью 10 Вт (цветовая температура 4000 К), так и без него.

Из суспензий микроорганизмов и частиц $g\text{-C}_3\text{N}_4$ при времени экспозиции, равном 0, 30, 60, 90 и 120 мин отбирали 100 мкл жидкости и делали высев поверхностным методом на плотную питательную среду. Также отбирали дополнительные 100 мкл жидкости и готовили 2 последовательных десятикратных разведения в 900 мкл физиологического раствора и высевали на поверхность среды. Посевы инкубировали при температуре (36 ± 1) °С в течение 48 ч. После инкубирования оценивали сформированные колонии и проводили подсчет колоний, имеющих типичные морфологические признаки [13]. Результаты учитывали по количеству сформированных колоний микроорганизмов с последующим пересчетом колониеобразующих единиц на 1 мл (КОЕ/мл).

¹ Инструкция по методам проверки и оценки антимикробной активности дезинфицирующих и антисептических средств: утв. гл. госуд. сан. врачом Респ. Беларусь 22.12.2003 (№ 11-20-204-2003). – Минск, 2003. – 41 с.

Результаты и их обсуждение. Морфология синтезированного материала до измельчения показана на рисунке. Термическая обработка тиокарбамида при 500 °С приводит к образованию спеченного материала, состоящего из произвольно ориентированных пластинок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ толщиной от 100 до 300 нм, с пустотами сравнимого размера. Механическое измельчение приводит к расслоению материала до отдельных пластинок и мелких частиц из них, сохраняющих неоднородную структуру. Учитывая слоистую структуру $g\text{-C}_3\text{N}_4$, можно также ожидать отслоения тонких двумерных листов, особенно в жидкой среде после диспергирования.



Морфология $g\text{-C}_3\text{N}_4$, синтезированного при 500 °С, при различном увеличении
Morphology of the $g\text{-C}_3\text{N}_4$ synthesized at 500 °С, with different magnification

Оценку антимикробной эффективности водных суспензий $g\text{-C}_3\text{N}_4$ проводили по величине коэффициента ингибирования роста тест-культур микроорганизмов, который рассчитывали по формуле

$$I = \frac{A_0 - A_x}{A_0} 100,$$

где I – показатель ингибирования; A_0 – исходная микробная нагрузка; A_x – микробная нагрузка после экспозиции x минут в водной суспензии $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

Были введены следующие критерии:

100 % $\geq I > 90$ % – выраженное антимикробное действие;

89 % $\geq I > 50$ % – среднее антимикробное действие;

49 % $\geq I > 30$ % – незначительное антимикробное действие;

$I \leq 30$ % – отсутствие антимикробного действия.

Результаты оценки антимикробного действия $g\text{-C}_3\text{N}_4$ при активации излучением представлены в таблице.

Как видно из данных, приведенных в таблице, концентрации частиц 25–50 мкг/мл, а также время обработки 30 мин оказались неэффективны для инактивации бактерий – только для штамма *S. aureus* отмечался незначительный антимикробный эффект, максимальное значение коэффициента I составляло 33,7 %. В ряду концентраций антимикробный эффект в отношении данного микроорганизма был установлен для суспензий $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в концентрации 100 мкг/мл при времени экспозиции 60 мин и более при концентрации частиц 300 мкг/мл. В случае *P. aeruginosa* при данных условиях экспозиции отмечалось как среднее, так и выраженное антимикробное действие, значение коэффициента I колебалось от 45,2 до 95,0 %. Наименьшей восприимчивостью к антимикробному воздействию характеризовался грамотрицательный штамм *E. coli* ATCC 11229 – экспозиция с частицами концентрацией 300 мкг/мл в течение 120 мин приводила к гибели 62,5 % микробных клеток, незначительное антимикробное действие отмечалось только после 60 мин воздействия в максимальной концентрации.

Предложенная клеточная скрининговая тест-модель и критерии оценки антимикробной активности по интегральному показателю I позволили дать количественную и достоверную оценку

Антибактериальная активность графитоподобного нитрида углерода в водных суспензиях

Antibacterial activity of graphitic carbon nitride in water suspensions

Микроорганизм Microorganism	Концентрация наночастиц, кг/мл Concentration of nanoparticles, kg/ml	Коэффициент ингибирования роста тест-культур микроорганизмов (I), % Coefficient of growth inhibition of test cultures of microorganisms, (I), %				
		0 мин 0 min	30 мин 30 min	60 мин 60 min	90 мин 90 min	120 мин 120 min
<i>P. aeruginosa</i>	25	0,0	0,0	7,1	2,4	4,8
	50		4,8	7,1	19,0	23,8
	100		4,8	45,2	59,5	81,2
	300		16,7	82,1	86,0	95,0
<i>E. coli</i>	25	0,0	15,6	0,0	6,2	0,0
	50		0,0	0,0	9,4	3,1
	100		3,1	6,2	12,5	18,7
	300		6,2	34,4	37,5	62,5
<i>S. aureus</i>	25	0,0	2,1	6,3	2,1	0,0
	50		1,1	3,2	7,4	16,8
	100		15,8	21,1	57,9	70,5
	300		33,7	49,5	89,5	92,5

использованных частиц, что в дальнейшем обеспечит отбор наиболее эффективных продуктов нанотехнологий [14].

Заключение. Показано, что водные суспензии на основе механически измельченного графитоподобного нитрида углерода в диапазоне концентраций частиц 100–300 мкг/мл, полученного путем пиролизического разложения тиокарбамида с последующей полимеризацией его продуктов при 500 °С, приводят к снижению концентрации выживших бактерий при экспонировании излучением видимого диапазона в течение 60–120 мин. Снижение количества КОЕ носит нелинейный характер и может объясняется комбинированным воздействием частиц $g-C_3N_4$ на микроорганизмы. Наибольшую активность продемонстрировали суспензии с концентрацией частиц 300 мкг/мл. Устойчивость *E. coli* к воздействию частиц оказалась выше, чем у *S. aureus* и *P. aeruginosa*. Полученные результаты позволяют рекомендовать порошки графитоподобного нитрида углерода как опытные образцы для дальнейших углубленных исследований их антибактериальных свойств с целью оценки безопасности для здоровья человека при практическом использовании в системах фотокаталитической очистки воды и воздуха от патогенных и условно-патогенных бактерий.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 1.4. Авторы выражают благодарность Д. В. Жигулину за анализ образцов методом растровой электронной микроскопии.

Acknowledgement. The work is supported by the SPSI “Materials science, new materials and technologies”, project 1.4. We are grateful to D. V. Zhygulin for analysis of the samples with scanning electron microscopy.

Список использованных источников

1. A review on $g-C_3N_4$ -based photocatalysts / J. Wen [et al.] // Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 391, part B. – P. 72–123. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.030>
2. Das, D. Temperature-Dependent Photoluminescence of $g-C_3N_4$: Implication for Temperature Sensing / D. Das, S. L. Shinde, K. K. Nanda // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2016. – Vol. 8, N 3. – P. 2181–2186. <https://doi.org/10.1021/acsaami.5b10770>
3. Synthesis of Graphitic Carbon Nitride in Porous Silica Glass / E. B. Chubenko [et al.] // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, N 03–04. – P. 1940042-1–1940042-4. <https://doi.org/10.1142/s0219581x19400428>
4. Recovery Behavior of the Luminescence Peak from Graphitic Carbon Nitride as a Function of the Synthesis Temperature / E. B. Chubenko [et al.] // Crystal Research and Technology. – 2020. – Vol. 55, N 3. – P. 1900163-1–1900163-6. <https://doi.org/10.1002/crat.201900163>
5. Akhavan, O. Toxicity of graphene and graphene oxide nanowalls against bacteria / O. Akhavan, E. Ghaderi // ACS Nano. – 2010. – Vol. 4, N 10. – P. 5731–5736. <https://doi.org/10.1021/nn101390x>
6. Toxicology of graphene oxide nanosheets against paecilomycescatenulatus / X. Li [et al.] // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 2015. – Vol. 95, N 1. – P. 25–30. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1499-3>

7. Antibacterial activity of graphite, graphite oxide, graphene oxide, and reduced graphene oxide: Membrane and oxidative stress / S. Liu [et al.] // *ACS Nano*. – 2011. – Vol. 5, N 9. – P. 6971–6980. <https://doi.org/10.1021/nn202451x>
8. Wang, X. Evaluation of antibacterial effects of carbon nanomaterials against copper-resistant *Ralstonia solanacearum* / X. Wang, X. Liu, H. Han // *Colloids Surf. B: Biointerfaces*. – 2013. – Vol. 103. – P. 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.09.044>
9. Toxizität von Graphenoxid: Endoperoxide als Ursache / H. Pieper [et al.] // *Angew. Chem*. – 2016. – Vol. 128. – P. 413–416. <https://doi.org/10.1002/ange.201507070>
10. Graphene in the aquatic environment: Adsorption, dispersion, toxicity and transformation / J. Zhao [et al.] // *Environ. Sci. Technol*. – 2014. – Vol. 48, N 17. – P. 9995–10009. <https://doi.org/10.1021/es5022679>
11. Structural and Photoluminescence Properties of Graphite-Like Carbon Nitride / A. V. Baglov [et al.] // *Semiconductors*. – 2020. – Vol. 54, N 2. – P. 228–232. <https://doi.org/10.1134/s1063782620020049>
12. Дудчик, Н. В. Прокариотические тест-модели для оценки биологического действия и гигиенической регламентации факторов окружающей среды / Н. В. Дудчик, В. В. Шевляков // *Современные методологические проблемы изучения, оценки и регламентирования факторов окружающей среды, влияющих на здоровье человека, 15–16 дек. 2016 г.: материалы конф. / Науч. совет РФ по экологии человека и гигиене окружающей среды; редкол.: Ю. А. Ракманин (гл. ред.) [и др.]*. – М., 2016. – С. 187–189.
13. McLean, D. T. IQ-motif peptides as novel anti-microbial agents / D. T. McLean, F. T. Lundy, D. J. Timson // *Biochimie*. – 2013. – Vol. 95, N 4. – P. 875–880. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2012.12.004>
14. Дудчик, Н. В. Изучение свойств консорциума почвенных микроорганизмов как тест-объектов для оценки интегральной токсичности / Н. В. Дудчик // *Гигиена и санитария*. – 2012. – Т. 91, № 5. – С. 82–84.

References

1. Wen J., Xie J., Chen X., Li X. A review on $g\text{-C}_3\text{N}_4$ -based photocatalysts. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 391, part B, pp. 72–123. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.030>
2. Das D., Shinde S. L., Nanda K. K. Temperature-Dependent Photoluminescence of $g\text{-C}_3\text{N}_4$: Implication for Temperature Sensing. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 2181–2186. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b10770>
3. Chubenko E. B., Baglov A. V., Lisimova E. S., Borisenko V. E. Synthesis of Graphitic Carbon Nitride in Porous Silica Glass. *International Journal of Nanoscience*, 2019, vol. 18, no. 03–04, pp. 1940042-1–1940042-4. <https://doi.org/10.1142/s0219581x19400428>
4. Chubenko E. B., Denisov N. M., Baglov A. V., Bondarenko V. P., Uglov V. V., Borisenko V. E. Recovery Behavior of the Luminescence Peak from Graphitic Carbon Nitride as a Function of the Synthesis Temperature. *Crystal Research and Technology*, 2020, vol. 55, no. 3, pp. 1900163-1–1900163-6. <https://doi.org/10.1002/crat.201900163>
5. Akhavan O., Ghaderi E. Toxicity of graphene and graphene oxide nanowalls against bacteria. *ACS Nano*, 2010, vol. 4, no. 10, pp. 5731–5736. <https://doi.org/10.1021/nn101390x>
6. Li X., Li F., Gao Z., Fang L. Toxicology of graphene oxide nanosheets against *Paecilomyces catenulatus*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, vol. 95, no. 1, pp. 25–30. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1499-3>
7. Liu S., Zeng T. H., Hofmann M., Burcombe E., Wei J., Jiang R., Kong J., Chen Y. Antibacterial activity of graphite, graphite oxide, graphene oxide, and reduced graphene oxide: Membrane and oxidative stress. *ACS Nano*, 2011, vol. 5, no. 9, pp. 6971–6980. <https://doi.org/10.1021/nn202451x>
8. Wang X., Liu X., Han H. Evaluation of antibacterial effects of carbon nanomaterials against copper-resistant *Ralstonia solanacearum*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, vol. 103, pp. 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.09.044>
9. Pieper H., Chercheja S., Eigler S., Halbig C. E., Filipovic M. R., Mokhir A. Toxizität von Graphenoxid: Endoperoxide als Ursache. *Angewandte Chemie*, 2016, vol. 128, no. 1, pp. 413–416. <https://doi.org/10.1002/ange.201507070>
10. Zhao J., Wang Z., White J. C., Xing B. Graphene in the aquatic environment: Adsorption, dispersion, toxicity and transformation. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48, no. 17, pp. 9995–10009. <https://doi.org/10.1021/es5022679>
11. Baglov A. V., Chubenko E. B., Hnitsko A. A., Borisenko V. E., Malashevich A. A., Uglov V. V. Structural and Photoluminescence Properties of Graphite-Like Carbon Nitride. *Semiconductors*, 2020, vol. 54, no. 2, pp. 228–232. <https://doi.org/10.1134/s1063782620020049>
12. Dudchik N. V., Shevlyakov V. V. Prokaryotic test models for assessing the biological effect and hygienic regulation of environmental factors. *Sovremennye metodologicheskie problemy izucheniya, otsenki i reglamentirovaniya faktorov okruzhayushchei sredy, vliyayushchikh na zdorov'e cheloveka, 15–16 dekabrya 2016 g.: materialy konferencii / Nauch. sovet RF po ekologii cheloveka i gigiyene okruzhayushchei sredy; redkol.: Yu. A. Rakhmanin, glavnyi redaktor* [Rakhmanin Yu. A., ed. Modern methodological problems of the study, assessment and regulation of environmental factors affecting human health, December 15–16, 2016: materials conference]. Moscow, 2016, pp. 187–189 (in Russian).
13. McLean D. T., Lundy F. T., Timson D. J. IQ-motif peptides as novel anti-microbial agents. *Biochimie*, 2013, vol. 95, no. 4, pp. 875–880. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2012.12.004>
14. Dudchik N. V. Investigation of the properties of the soil microbial consortium as a test objects for estimation of integral toxicity. *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation], 2012, vol. 91, no. 5, pp. 82–84 (in Russian).

Информация об авторах

Чубенко Евгений Борисович – канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: eugene.chubenko@bsuir.by.

Баглов Алексей Викторович – науч. сотрудник. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: baglov@bsuir.by.

Емельянова Ольга Андреевна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. НПЦ гигиены Министерства здравоохранения Республики Беларусь (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lee616@ya.ru.

Дудчик Наталья Владимировна – д-р биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. НПЦ гигиены Министерства здравоохранения Республики Беларусь (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n_dudchik@tut.by.

Дроздова Елена Валентиновна – канд. мед. наук, доцент, заместитель директора по научной работе. НПЦ гигиены Министерства здравоохранения Республики Беларусь (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: drozdovaev@mail.ru.

Борисенко Виктор Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь); приглашенный профессор. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Каширское шоссе, 31, 115409, Москва, Российская Федерация). E-mail: borisenko@bsuir.by.

Information about the authors

Chubenko Eugene B. – PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (P. Browka Str., 6, 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: eugene.chubenko@bsuir.by.

Baglov Aleksey V. – Researcher. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (P. Browka Str., 6, 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: baglov@bsuir.by.

Emeliyanova Olga A. – Ph. D. (Biology), Senior Researcher. Scientific Practical Center of Hygiene (Akademicheskaya Str., 8, 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lee616@ya.ru.

Dudchik Natalia V. – D. Sc. (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory. Scientific Practical Center of Hygiene (Akademicheskaya Str., 8, 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n_dudchik@tut.by.

Drazdova Alena V. – Ph. D. (Medicine), Associate Professor, Vice director. Scientific Practical Center of Hygiene (Akademicheskaya Str., 8, 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: drozdovaev@mail.ru.

Borisenko Victor E. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (P. Browka Str., 6, 220013, Minsk, Republic of Belarus); Invited Professor. National Research Nuclear University «MEPhI» (Kashirskoe Shosse, 31, 115409, Moscow, Russian Federation). E-mail: borisenko@bsuir.by.