

DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-25-33

УДК 535.361

СПЕКТРЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДНК И АДФ, НАХОДЯЩИХСЯ В ФОТОННЫХ ЛОВУШКАХ, ПРИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

В.С. Горелик^{1,2}, Г.И. Довбешко³, А.Ю. Пятышев^{1,4}

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Российская Федерация

e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

³Институт физики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

⁴НПП “Исток” им. А.И. Шокина, Фрязино, Московская обл.,
Российская Федерация

Зарегистрированы спектры фотолюминесценции дезоксирибонуклеиновой кислоты и аденозиндифосфата, находящихся в фотонных ловушках, при возбуждении ультрафиолетовым излучением. Установлено, что в малом ($\sim 1 \text{ мм}^3$) объеме фотонной ловушки происходит пленение излучения в анализируемых веществах. Обнаружено существенное перераспределение интенсивности, объемное перемещение при переходе от режима спонтанной люминесценции к суперлюминесценции. На основе выполненных экспериментов сделан вывод о возможности лазерной генерации в дезоксирибонуклеиновой кислоте и близких по структуре биологических соединениях.

Ключевые слова: фотолюминесценция, ДНК, АДФ, лазер, фотонная ловушка, ультрафиолетовое излучение, спектр.

PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF DNA AND ADP IN PHOTON TRAPS UNDER ULTRAVIOLET EXCITATION

V.S. Gorelik^{1,2}, G.I. Dovbeshko³, A.Yu. Pyatyshv^{1,4}

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

²Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow,

Russian Federation

e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

³Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

⁴Research and Production Corporation Istok n.a. A.I. Shokin, Fryazino,
Moscow Region, Russian Federation

The main purpose of the article is to examine and record the photoluminescence spectra of deoxyribonucleic acid and adenosine diphosphate in photon traps under ultraviolet radiation. The findings of the research show that in the small ($\sim 1 \text{ mm}^3$) volume of photon trap radiation trapping occurs in the substance under study. There is a significant redistribution of intensity, due to the transition from spontaneous luminescence to superluminescence. On the basis of the experiments conducted we conclude that laser generation in deoxyribonucleic acid and similar in structure biological compounds is possible.

Keywords: photoluminescence, DNA, ADP, laser, photon trap, ultraviolet radiation, spectrum.

Нуклеиновые кислоты присутствуют в биоструктурах и играют важную роль в процессах жизнедеятельности. Изучение их структуры и динамических характеристик — одна из актуальных областей молекулярной биологии. Пример таких кислот — дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК), представляющая собой биополимер, мономером которого является нуклеотид [1–3]. Каждый нуклеотид состоит из остатка фосфорной кислоты, присоединенного к сахару дезоксирибозе, к которому через гликозидную связь присоединено одно из четырех азотистых оснований: аденин (А); гуанин (G); цитозин (С); тимин (Т). Полимер ДНК обладает довольно сложной структурой [4–6].

Аденозиндифосфат (АДФ) — нуклеотид, состоящий из аденина, рибозы и двух остатков фосфорной кислоты — образуется в результате переноса концевой фосфатной группы аденозинтрифосфата (АТФ). Аденозиндифосфат участвует в энергетическом обмене во всех живых организмах [7]. В высших организмах присутствует белковый комплекс, осуществляющий специфический перенос через биологические мембраны АТФ в обмен на АДФ (транслоказа адениновых нуклеотидов) и являющийся первым хорошо изученным белком-переносчиком [8].

Квантовый выход фотолуминесценции нуклеиновых оснований и ДНК очень мал [9–12]. Зависимость флуоресценции ДНК от кислотности рН раствора проанализирована в работе [11]. При этом возбуждение флуоресценции в ДНК осуществлялось дуговой ксеноновой лампой ДКСШ-1000; спектры регистрировались с помощью монохроматора DMR-4. Спектры фотолуминесценции водных растворов нуклеиновых оснований и ДНК при низких температурах рассмотрены в работах [13–15]. Возбуждение вторичного излучения осуществлялось ртутной лампой, регистрация спектров — спектрофлуориметрами Hitachi 850 и MRF-4. Полученные в указанных работах спектры фосфоресценции и флуоресценции были зарегистрированы в диапазоне длин волн 400... 550 нм. Анализ спектров фотолуминесценции ДНК при комнатной температуре выполнялся при введении в растворы различных красителей [16, 17]. Применение стирил-цианиновых красителей также позволило зарегистрировать двухфотонно-возбуждаемую люминесценцию ДНК в видимой области спектра [18]. Использование пористого кремния для улучшения условий регистрации спектров фотолуминесценции водных растворов ДНК и некоторых лекарств было предложено в работе [19]. Возможность получения спектров молекул ДНК, находящихся на поверхности синтетического опала, была показана в работе [20]. Было установлено, что повысить квантовый выход

можно за счет создания комплексных соединений ДНК с углеродными нанотрубками [21] или добавления в раствор различных ионов или квантовых точек [22, 23].

Аналізу люминесценції АДФ посвящено кілька робіт [24–28]. Залежність флуоресценції розчинів АДФ від кислотності рН середовища досліджувалась в роботах [24, 25]. Використовувати АДФ як флуоресцентну мітку при дослідженні процесів метаболізму в клітках тваринних пропонується в роботі [26], аналіз вмісту АДФ і інших нуклеотидів в плазмі крові і крові людини і тваринних з використанням люмінесценції був проведений в роботах [27, 28].

В нинішній роботі поставлена задача дослідження спектрів фотолюмінесценції ДНК і АДФ, поміщених в фотонні ловушки, при лазерному ультрафіолетовому імпульсно-періодическому збудженні.

Для збудження і реєстрації спектрів фотолюмінесценції використовувалась волоконно-оптична методика. Принципіальна схема експериментальної установки приведена на рис. 1. В якості джерела збуджуючого ультрафіолетового випромінювання використовувалась четверта гармоніка (266 нм) лазера 1 на алюмоіттриєвому гранаті DTL-389QT, генеруючого імпульсно-періодическе випромінювання довжиною хвилі 1064 нм, со середньою потужністю генерації 10 мВт і частотою слідування імпульсів 3 кГц при їх тривалості 10 нс.

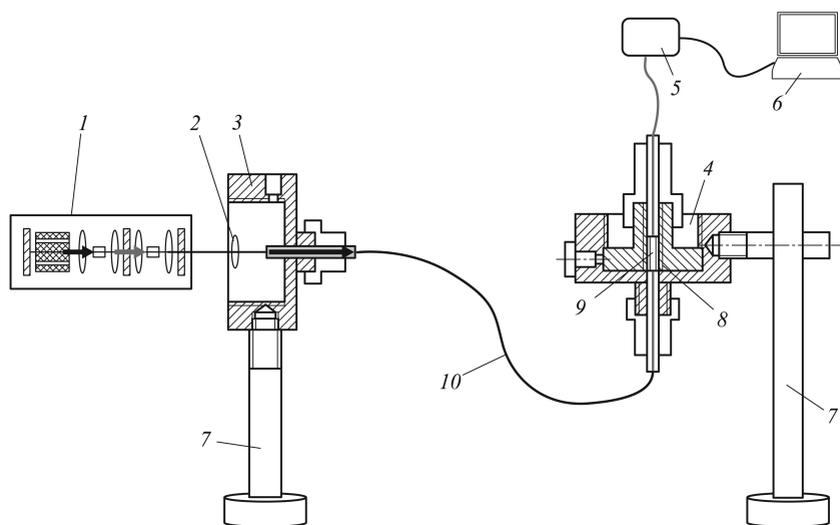


Рис. 1. Схема експериментальної установки для реєстрації спектрів фотолюмінесценції:

1 – лазер DTL-389QT; 2 – збираюча лінза; 3 – пристрій кріплення світловода; 4 – кювета в зборі; 5 – мініспектрометр FSD-8; 6 – комп'ютер; 7 – пристрій кріплення; 8 – зонд з одним світловодом; 9 – фотонна ловушка з речовиною; 10 – світловод

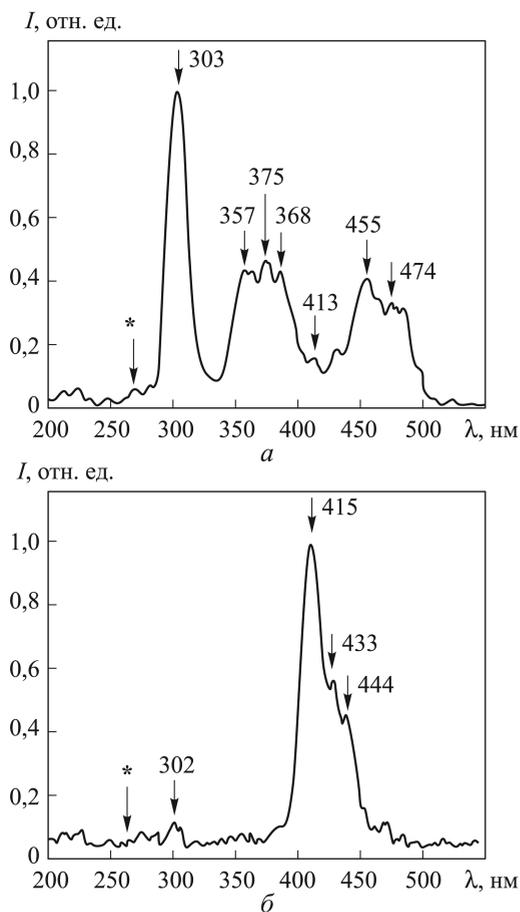


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции ДНК теленка (а) и водного раствора АДФ (б) (звездочкой отмечено положение возбуждающей линии)

Спектр фотолюминесценции водного раствора АДФ показан на рис. 2, б. В спектре имеется довольно узкий и интенсивный пик в синей области, а также слабый максимум в ультрафиолетовой области спектра.

Наблюдаемые эффекты перераспределения интенсивности в спектрах вторичного излучения исследуемых соединений можно объяснить переходом от режима спонтанной фотолюминесценции к режиму суперлюминесценции. Это обусловлено эффективным заселением возбужденного синглетного терма ароматической молекулы под действием интенсивного импульсного ультрафиолетового лазерного излучения.

В этом случае природа усиления аналогична известному механизму в лазерах на красителях [29–31]. При этом формула для коэффициента усиления имеет вид $K = \sigma (N_{S_1} - N_{S_0}) \approx \sigma N_{S_1}$. При условии, что

Возбуждающее излучение с помощью кварцевого световода 10 направлялось в кювету 4 с исследуемым веществом 9, находящимся в фотонной ловушке. Ловушка представляет собой дюралевый цилиндр объемом около 1 мм³. Использование фотонной ловушки позволяет добиться преобразования значительной доли падающего ультрафиолетового излучения в фотолюминесценцию находящегося в ней вещества. Вторичное излучение (фотолюминесценция) направлялось другим световодом к входной щели миниспектрометра FSD-8 5. Цифровые данные о спектре вторичного излучения передавались на компьютер б.

Результаты исследований и их обсуждение.

Спектр фотолюминесценции ДНК теленка приведен на рис. 2, а. Спектр имеет узкий интенсивный максимум в ультрафиолетовой области спектра.

эффективное сечение составляет $\sigma \sim 10^{-16} \text{ см}^2$, а концентрация молекул в водном растворе — $N_{S_1} \sim 10^{17} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$, получим коэффициент усиления, равный $K \sim 10 \dots 100 \text{ см}^{-1}$. В соответствии с законом Бугера для активной среды запишем $I(L) = I_0 e^{KL} \sim (10^2 \dots 10^3) I_0$ для $L \sim 0,1 \dots 1,0 \text{ мм}$. Выполненные оценки объясняют вид спектра фотолюминесценции ДНК и водного раствора АДФ. Особенность наблюдаемого эффекта — проявление суперлюминесценции в ультрафиолетовой области спектра, соответствующей положению первого возбужденного электронного синглетного терма в исследуемых веществах.

Заключение. В настоящей работе зарегистрированы спектры фотолюминесценции ДНК и АДФ, находящихся в фотонных ловушках. Установлено, что использование фотонной ловушки и импульсно-периодического ультрафиолетового возбуждающего излучения с длиной волны 266 нм существенно изменяет спектр фотолюминесценции исследуемых соединений по сравнению с изменениями, описанными в известной в литературе [9–15]. Наблюдаемый эффект аномального возрастания интенсивности коротковолнового излучения фотолюминесценции ДНК объясняется переходом от режима спонтанной фотолюминесценции к суперлюминесценции.

Следовательно, открывается возможность для получения лазерной генерации на электронном переходе в ДНК и родственных структурах, аналогичной лазерной генерации в органических красителях. В результате может быть осуществлено импульсно-периодическое воздействие на биологические структуры и ДНК, приводящее к процессам репарации ДНК и другим фотостимулированным процессам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 12-02-00491, № 13-02-00449, № 13-02-90420, № 14-02-00190).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Duguid J.G., Bloomfield V.A., Benevides J.M., Thomas Jr. G.J.* DNA Melting Investigated by Differential Scanning Calorimetry and Raman Spectroscopy // *Biophysical Journal*. 1996. Vol. 71. Iss. 6. P. 3350–3360.
2. *Molecular Biology of the Cell* / B. Alberts, A. Johnson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, P. Walter. 4th ed. New York: Garland Science, 2002. 1392 p.
3. *Butler J.M.* Forensic DNA Typing: Biology and Technology behind STR Markers. London: Academic Press, 2001. 335 p.
4. *Watson J.D., Crick F.H.C.* Molecular structure of nucleic acids; a structure for deoxyribose nucleic acid // *Nature*. 1953. Vol. 171. No. 4356. P. 737–738.
5. *Berg J.M., Tymoczko J.L., Stryer L.* Biochemistry. 7th ed. New York: W.H. Freeman and Company, 2012. 608 p.
6. *Ghosh A., Bansal M.* A glossary of DNA structures from A to Z // *Acta Crystallographica Section D*. 2003. Vol. 59. Part 4. P. 620–626.

7. *Michelson A.M.* The chemistry of nucleosides and nucleotides. London, New York: Academic Press, 1963. 667 p.
8. *Кретович В.Л., Шольц К.Ф.* Методы современной биохимии. М.: Наука, 1975. 176 с.
9. *Stimson M.M., Reuter M.A.* Fluorescence of Purines and Pyrimidines // Journal of the American chemical society. 1941. Vol. 63. Iss. 3. P. 697–699.
10. *Adrien A., Brown D.J.* Purine Studies. Part I. Stability to Acid and Alkali. Solubility. Ionization. Comparison with Pteridines // Journal of the Chemical Society. 1954. P. 2060–2071.
11. *Pisarevskii A.N., Cherenkevich S.N., Andrianov V.T.* Fluorescence spectrum and quantum yield of DNA in solution // Zhurnal Prikladnoi Spektroskopii. 1966. Vol. 5. No. 5. P. 621–624.
12. *Яцук В.М.* Особенности люминесценции ДНК и РНК // Материалы XIX Международной школы-семинара “Спектроскопия молекул и кристаллов”. Украина, Крым, Береговое, 20–27 сентября 2009. 42 с.
13. *The effect of triplet-triplet excitation energy transfer on the DNA self-protection mechanism / V.M. Yashchuk, V.Yu. Kudrya, M.Yu. Losytskyu, I.Ya. Dubey, T.Y. Ohulchanskyu, H. Suga, S.M. Yarmoluk // Наук. записки НаУКМА: Сер. Фізико-математич. науки. 2006. Т. 51. С. 48–56.*
14. *The nature of the electronic excitations capturing centers in the DNV / V.M. Yashchuk, V.Yu. Kudrya, M.Yu. Losytskyu, H. Suga, T.Y. Ohulchanskyu // Journal of Molecular Liquids. 2006. Vol. 127. Iss. 1–3. P. 79–83.*
15. *Yashchuk V.M., Kudrya V.Yu., Levchenko S.M., Yevtushenko N.V.* Some peculiarities of electronic excitation energy structure of the biologic polynucleotides and processes of triplet excitation trapping // Наук. записки НаУКМА: Сер. Фізико-математич. науки. 2007. Т. 61. С. 39–42.
16. *Vigny P., Favre A.* Fluorescence and photochemistry of oligocytidylic and polycytidylic acids in aqueous solution // Photochemistry and Photobiology. 1974. Vol. 20. Iss. 4. P. 345–349.
17. *Morgan J.P., Daniels M.* Excited states of DNA and its components at room temperature – III. Spectra, polarization and quantum yields of emissions from ApA and poly rA* // Photochemistry and Photobiology. 1980. Vol. 31. Iss. 2. P. 101–113.
18. *Optical Biomedical Diagnostics: Sensors with Optical Response Based on Two-Photon Excited Luminescent Dyes for Biomolecules Detection / V.M. Yashchuk, S.M. Yarmoluk, V.Yu. Kudrya, M.Yu. Losytskyu, V.P. Tokar, V.M. Kravchenko, V.B. Kovalska, A.O. Balanda, D.V. Kryvotenko // Advances in Optical Technologies. 2008. Vol. 2008. P. 908246–908257.*
19. *Определение АФК в присутствии биологически активных веществ по флуоресценции пористого кремния / В.Б. Шевченко, О.И. Даценко, О.В. Шаблюкин, Т.В. Осадчук, О.М. Ляхов, Ю.В. Пивоваренко, В.А. Макара // Український біохімічний журнал. 2012. Т. 84. № 4. С. 74–78.*
20. *New Optical Properties of Synthetic Opals Infiltrated by DNA / V. Boyko, G. Dovbeshko, O. Fesenko, V. Gorelik, V. Moiseenko, V. Romanyuk, T. Shvets, P. Vodolazkyu // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2011. Vol. 535. Iss. 1. P. 30–41.*
21. *Intense photoluminescence from dried double-stranded DNA and single-walled carbon nanotube hybrid / M. Ito, T. Kobayashi, Y. Ito, T. Hayashida, D. Nii, K. Umemura, Y. Homma // Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104. Iss. 4. P. 043102-1–043102-3.*
22. *Photoactive Deoxyribonucleic Acid (DNA) Bearing Carbazole Moieties and Its Photoluminescence Behavior with Ir (III) Complex / Y.S. Kim, U.R. Lee, J.E. Lee, M.J. Cho, Jin Jung-II, D.H. Shin, Choi Suk-Ho, D.H. Choi // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2010. Vol. 519. Iss. 1. P. 227–233.*
23. *Murphy C.J., Brauns E.B., Gearheart L.* Quantum dots as inorganic DNA-binding proteins // Material research society Processing. 1996. Vol. 452. P. 597–601.

24. *Walaas E.* Fluorescence of Adenine and Inosine Nucleotides // *Acta Chemica Scandinavica*. 1963. Vol. 17. P. 461–463.
25. *Börresen H. CHR.* On the luminescence properties of some purines and pyrimidines // *Acta Chemica Scandinavica*. 1963. Vol. 17. P. 921–929.
26. *Kumar A., Prasher P., Singh P.* A fluorescent probe for estimation of adenosine diphosphate and monitoring of glucose metabolism // *Organic & Biomolecular Chemistry*. 2014. Iss. 12. P. 3071–3079.
27. *Jabs C.M., Ferrell W.J., Robb H.J.* Plasma ADP levels: Direct determination with luciferase luminescence using a biometer // *Clinical Biochemistry*. 1978. Vol. 11. Iss. 5. P. 190–193.
28. *Gorman M.W., Marble D.R., Ogimoto K., Feigl E.O.* Measurement of adenine nucleotides in plasma // *Luminescence*. 2003. Vol. 18. Iss. 3. P. 173–181.
29. *Soffer B.H., McFarland B.B.* Continuously tunable, narrow-band organic dye lasers // *Applied Physics Letters*. 1967. Vol. 10. P. 266–267.
30. *Svelto O.* Principles of Lasers. New York: Plenum Publishing, 1976. 370 p.
31. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.

REFERENCES

- [1] Duguid J.G., Bloomfield V.A., Benevides J.M., Thomas Jr.G.J. DNA Melting Investigated by Differential Scanning Calorimetry and Raman Spectroscopy. *Biophysical Journal*, 1996, vol. 71, iss. 6, pp. 3350–3360.
- [2] Alberts B., Johnson A., Lewis J., Raff M., Roberts K., Walter P. Molecular Biology of the Cell. 4th ed. N.Y., Garland Science, 2002. 1392 p.
- [3] Butler J.M. Forensic DNA Typing: Biology and Technology behind STR Markers. London, Academic Press, 2001. 335 p.
- [4] Watson J.D., Crick F.H.C. Molecular structure of nucleic acids; a structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*, 1953, vol. 171, no. 4356, pp. 737–738.
- [5] Berg J.M., Tymoczko J.L., Stryer L. Biochemistry. 7th ed. N.Y., W.H. Freeman and Company, 2012. 608 p.
- [6] Ghosh A., Bansal M. A glossary of DNA structures from A to Z. *Acta Crystallographica Section D*, 2003, vol. 59, part 4, pp. 620–626.
- [7] Michelson A.M. The chemistry of nucleosides and nucleotides. London, N.Y., Academic Press, 1963. 667 p.
- [8] Kretovich V.L., Shol'ts K.F. Metody sovremennoy biokhimii [Methods of Modern Biochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 176 p.
- [9] Stimson M.M., Reuter M.A. Fluorescence of Purines and Pyrimidines. *Journal of the American chemical society*, 1941, vol. 63, iss. 3, pp. 697–699.
- [10] Adrien A., Brown D.J. Purine Studies. Part I. Stability to Acid and Alkali. Solubility. Ionization. Comparison with Pteridines. *Journal of the Chemical Society*, 1954, pp. 2060–2071.
- [11] Pisarevskii A.N., Cherenkevich S.N., Andrianov V.T. Fluorescence spectrum and quantum yield of DNA in solution. *Zhurnal Prikladnoi Spektroskopii*, 1966, vol. 5, no. 5, pp. 621–624.
- [12] Yashchuk V.M. Features of the DNA and RNA Luminescence. *Mat. XIX Mezhdunar. shkoly-seminara "Spektroskopiya molekul i kristallov"* [Proc. of the XIX International Workshop-School "Spectroscopy of Molecules and Crystals]. Ukraina, Krym, Beregovoe, 20–27 Sept. 2009. 42 p. (in Russ.).
- [13] Yashchuk V.M., Kuclrya V.Yu., Losytskyy M.Yu., Dubey I.Ya., Ohulchanskyy T.Y., Suga H., Yarmoluk S.M. The effect of triplet-triplet excitation energy transfer on the DNA self-protection mechanism. *Naukov. zapiski NaUKMA. Ser. Fiziko-matematichn. nauki* [Scientific Notes NaUKMA. Ser. Phys. and Math. Sciences], 2006, vol. 51, pp. 48–56.

- [14] Yashchuk V.M., Kudrya V.Yu., Losytskyy M.Yu., Suga H., Ohulchanskyy T.Y. The nature of the electronic excitations capturing centers in the DNV. *Journal of Molecular Liquids*, 2006, vol. 127, iss. 1–3, pp. 79–83.
- [15] Yashchuk V.M., Kudrya V.Yu., Levchenko S.M., Yevtushenko N.V. Some peculiarities of electronic excitation energy structure of the biologic polynucleotides and processes of triplet excitation trapping. *Naukov. zapiski NaUKMA. Ser. Fiziko-matematichn. nauki* [Scientific Notes NaUKMA. Ser. Phys. and Math. Sciences], 2007, vol. 61, pp. 39–42.
- [16] Vigny P., Favre A. Fluorescence and photochemistry of oligocytidylic and polycytidylic acids in aqueous solution. *Photochemistry and Photobiology*, 1974, vol. 20, iss. 4, pp. 345–349.
- [17] Morgan J.P., Daniels M. Excited states of DNA and its components at room temperature – III. Spectra, polarization and quantum yields of emissions from ApA and poly rA*. *Photochemistry and Photobiology*, 1980, vol. 31, iss. 2, pp. 101–113.
- [18] Yashchuk V.M., Yarmoluk S.M., Kudrya V.Yu., Losytskyy M.Yu., Tokar V.P., Kravchenko V.M., Kovalska V.B., Balanda A.O., Kryvotenko D.V. Optical Biomedical Diagnostics: Sensors with Optical Response Based on Two-Photon Excited Luminescent Dyes for Biomolecules Detection. *Advances in Optical Technologies*, 2008. vol. 2008, pp. 908246–908257.
- [19] Shevchenko V.B., Datsenko O.I., Shablikin O.V., Osadchuk T.V., Lyakhov O.M., Pivovarenko Yu.V., Makara V.A. Estimation of the Ros in the Presence of Biologically Active Substances by Porous Silicon Fluorescence. *Ukrains'kiy Biokhimichnyi Zhurnal* [The Ukrainian Biochemical Journal], 2012, vol. 84, no. 4, pp. 74–78 (in Russ.).
- [20] Boyko V., Dovbeshko G., Fesenko O., Gorelik V., Moiseenko V., Romanyuk V., Shvets T., Vodolazkyy P. New Optical Properties of Synthetic Opals Infiltrated by DNA. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2011, vol. 535, iss. 1, pp. 30–41.
- [21] Ito M., Kobayashi T., Ito Y., Hayashida T., Nii D., Umemura K., Homma Y. Intense photoluminescence from dried double-stranded DNA and single-walled carbon nanotube hybrid. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 104, iss. 4, pp. 043102-1–043102-3.
- [22] Kim Y.S., Lee U.R., Lee J.E., Cho M.J., Jung-II Jin, Shin D.H., Choi Suk-Ho, Choi D.H. Photoactive Deoxyribonucleic Acid (DNA) Bearing Carbazole Moieties and Its Photoluminescence Behavior with Ir (III) Complex. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2010, vol. 519, iss. 1, pp. 227–233.
- [23] Murphy C.J., Brauns E.B., Gearheart L. Quantum dots as inorganic DNA-binding proteins. *Material research society Processing*, 1996, vol. 452, pp. 597–601.
- [24] Walaas E. Fluorescence of Adenine and Inosine Nucleotides. *Acta Chemica Scandinavica*, 1963, vol. 17, pp. 461–463.
- [25] Börresen H.CHR. On the luminescence properties of some purines and pyrimidines. *Acta Chemica Scandinavica*, 1963, vol. 17, pp. 921–929.
- [26] Kumar A., Prasher P., Singh P. A fluorescent probe for estimation of adenosine diphosphate and monitoring of glucose metabolism. *Organic & Biomolecular Chemistry*, 2014, iss. 12, pp. 3071–3079.
- [27] Jabs C.M., Ferrell W.J., Robb H.J. Plasma ADP levels: Direct determination with luciferase luminescence using a biometer. *Clinical Biochemistry*, 1978, vol. 11, iss. 5, pp. 190–193.
- [28] Gorman M.W., Marble D.R., Ogimoto K., Feigl E.O. Measurement of adenine nucleotides in plasma. *Luminescence*, 2003, vol. 18, iss. 3, pp. 173–181.
- [29] Soffer B.H., McFarland B.B. Continuously tunable, narrow-band organic dye lasers. *Applied Physics Letters*, 1967, vol. 10, pp. 266–267.

[30] Svelto O. Principles of Lasers. N.Y., Plenum Publishing, 1976. 370 p.

[31] Landsberg G.S. Optika [Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 926 p.

Статья поступила в редакцию 10.02.2015

Горелик Владимир Семенович — д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией “Комбинационное рассеяние света” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53), профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Gorelik V.S. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Raman Scattering laboratory, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences (Leninskiy prospekt 53, Moscow, 119991 Russian Federation), Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Довбешко Галина Ивановна — д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела физики биологических систем Института физики НАН Украины (Украина, 03028, Киев, пр-т Науки, д. 46).

Dovbeshko G.I. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Senior Research Scientist of Physics Biological Systems Department, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Prospekt Nauki 46, Kiev, 03028 Ukraine).

Пятышев Александр Юрьевич — аспирант кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5), инженер НПП “Исток” им. А.И. Шокина (Российская Федерация, 141190, Московская обл., Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а).

Pyatyshev A.Yu. — post-graduate student of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation), Engineer of Research and Production Corporation Istok n.a. A.I. Shokin (ul. Vokzalnaya 2a, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Горелик В.С., Довбешко Г.И., Пятышев А.Ю. Спектры фотолуминесценции ДНК и АДФ, находящихся в фотонных ловушках, при ультрафиолетовом возбуждении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 2. С. 25–33. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-25-33

Please cite this article in English as:

Gorelik V.S., Dovbeshko G.I., Pyatyshev A.Yu. Photoluminescence spectra of DNA and ADP in photon traps under ultraviolet excitation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 2, pp. 25–33. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-25-33