

УДК 577.15, 543.55
EDN: ZCRITV

PACS: 87.15.R-

**Наносенсоры для наблюдения за единичными молекулами
цитохрома P450 BM3**

© И. Д. Шумов^{1*}, В. С. Зиборов^{1,2}, А. Н. Аблеев¹, А. В. Виноградова¹, О. Н. Афонин¹,
Н. С. Бухарина¹, Н. В. Ваулин³, Д. В. Лебедев³, А. С. Букатин³, И. С. Мухин³,
И. Н. Сараева⁴, А. И. Арчаков¹, Ю. Д. Иванов^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт
биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича», Москва, 119121 Россия

* E-mail: shum230988@yandex.ru

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких
температур Российской академии наук, Москва, 125412 Россия

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет),
Санкт-Петербург, 194021 Россия

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт
им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва, 119333 Россия

Статья поступила в редакцию 25.12.2025; после доработки 30.01.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.13

Наблюдение за поведением одиночных молекул цитохрома P450 BM3 проводили с помощью двух наносенсоров — электрического нанопорового детектора (ЭНПД) и атомно-силового микроскопа (АСМ). ЭНПД на базе твердотельной нанопоры, сформированной в неорганической подложке на основе нитрида кремния, использовали для регистрации функциональной активности P450 BM3 в реакции гидроксирования лаурата в присутствии NADPH. Функциональная активность исследованного фермента подтверждена методом спектрофотометрии (СФ). С помощью АСМ визуализировали динамику поведения молекул фермента на поверхности неорганической подложки. Полученные результаты наглядно демонстрируют перспективность использования нанотехнологических детекторов для определения физико-химических свойств ферментов на уровне единичных молекул с целью более глубокого понимания фундаментальных принципов функционирования ферментных систем.

Ключевые слова: цитохром P450, твердотельная нанопора, ферментативная активность, атомно-силовая микроскопия, спектрофотометрия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-94-100

Введение

Устройства с наноразмерными чувствительными элементами, сопоставимыми по геометрическим размерам с единичными макромолекулами белков и нуклеиновых кислот, все шире используются в фундаментальных исследованиях. Так, атомно-силовой микроскоп

(АСМ) позволяет визуализировать единичные макромолекулы белков, включая ферменты [1, 2], адсорбированных на твердой поверхности; в свою очередь, электрические детекторы (ЭНПД) на базе твердотельных нанопор позволяют регистрировать единичные макромолекулы ферментов [3, 4] и проводить мониторинг ферментативных процессов [5, 6].

Процессы в живых организмах катализируются ферментами [7], поэтому для понимания какого-либо процесса необходимо иметь детальное представление о механизме и кинетике функционирования регулирующих его ферментов. В настоящий момент для изучения кинетики ферментативных процессов в подавляющем большинстве случаев используют макроскопические методы; в этих методах регистрируют усредненный сигнал, поступающий от ансамбля из большого числа молекул изучаемого фермента [8]. Анализ кинетики ферментативного каталитического процесса на уровне единичных молекул является более глубоким и информативным и исключительно полезен для понимания процессов, протекающих в живых клетках [8]. В этой связи очевидна перспективность использования ЭНПД для изучения ферментативных процессов на уровне единичных молекул. Принцип работы ЭНПД заключается в регистрации ионного тока, протекающего через нанопору, сформированную в неорганической мембране, которая разделяет две камеры с раствором электролита [4–6]. Макромолекула исследуемого фермента, которую встраивают в нанопору, частично перекрывает нанопору, модулируя протекающий через нанопору ионный ток. В процессе ферментативного катализа происходят изменения структуры макромолекулы фермента в нанопоре, что, соответственно, вызывает флуктуации ионного тока, которые и регистрируются.

Следует также отметить важность использования АСМ для изучения физико-химических свойств единичных макромолекул ферментов – таких, как адсорбционные [2], диффузионные свойства [9] и ферментативная активность [1]. Так, ранее было продемонстрировано успешное использование АСМ для определения активности единичных молекул фермента цитохрома P450 BM3 [1].

В представленной работе предложено использование ЭНПД на базе твердотельной нанопоры для регистрации ферментативной активности единичной молекулы цитохрома P450 BM3 в реакции гидроксирования лаурата в присутствии NADPH. Твердотельную нанопору формировали в мембране из нитрида кремния (Si_3N_4 , далее SiN). Взаимодействие молекулы фермента с поверхностью неорганической мембраны может оказывать влияние

на процесс встраивания этой молекулы в нанопору. В этой связи нами предложено параллельно с ЭНПД и спектрофотометрией (далее СФ) использование АСМ для изучения поведения исследуемого фермента на твердой поверхности неорганической кремнийсодержащей подложки. Учитывая позитивный опыт комбинированного использования нанотехнологических (атомно-силовая микроскопия) и макроскопических (СФ) методов исследования физико-химических свойств ферментов [2], в настоящей работе предложено использование этого подхода применительно к цитохрому P450 BM3. Использование классического метода СФ [10] позволяет подтвердить функциональную активность исследуемого фермента [2].

В качестве объекта исследования в наших экспериментах использован цитохром P450 BM3, принадлежащий к суперсемейству гем-содержащих монооксигеназ – цитохромов P450 – и катализирующий монооксигенацию жирных кислот [11]. Этот фермент является каталитически самодостаточным [11], то есть для его функционирования не требуются белки-партнеры. Этот факт делает цитохром P450 BM3 очень удобным модельным объектом для изучения системы цитохрома P450, играющей ключевую роль в метаболизме ксенобиотиков [12].

Цель настоящей работы — исследование динамики поведения единичной молекулы цитохрома P450 BM3 на неорганической подложке как до, так и в процессе ферментативной реакции.

Материалы и методы

Постановка работы. Для изучения функционирования единичной молекулы P450 BM3 в реакции гидроксирования лаурата в присутствии восстановленной формы никотинамидадениндинуклеотидфосфата (NADPH) использовали ЭНПД на базе твердотельной нанопоры, сформированной в мембране из SiN. Параллельно подтверждали функциональную активность фермента в этой реакции классическим методом СФ [12]. Для визуализации поведения молекул исследуемого фермента на поверхности неорганической кремнийсодержащей подложки эти молекулы визуализировали при помощи АСМ в жидкости.

Реактивы и фермент. В работе использовали цитохром CYP102A1 дикого типа который был любезно предоставлен профессором А. В. Манро (A. W. Munro; Университет Манчестера, Великобритания); фермент был экспрессирован и препаратирован, как описано Neeli et al. [10]. Фермент был также экспрессирован А. В. Грудю (Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь). Лаурат натрия (чистота $\geq 99\%$) и NADPH были закуплены у фирмы Sigma (США). Гидроокись калия (ч.д.а.) и однозамещенный фосфат натрия (Na_2HPO_4 , ч.д.а.) были приобретены в Реахим (Москва). Хлористый калий (KCl) был закуплен у фирмы Fluka (ФРГ). Фосфатно-солевой буфер в модификации Дульбекко (буфер ФСБ-Д, pH 7,4; 8 ммоль/л NaHPO_4 , 2 ммоль/л KH_2PO_4 , 140 ммоль/л NaCl, 10 ммоль/л KCl) готовили из смеси солей, приобретенных у компании Pierce (США). Все растворы, использованные в экспериментах, были приготовлены с использованием деионизированной ультрачистой воды (18,2 МОм·см), полученной с помощью установки Simplicity UV (Millipore, Франция).

Измерения при помощи ЭНПД. ЭНПД включал в себя жидкостную измерительную ячейку с двумя камерами объемом 700 мкл каждая, отделенными друг от друга SiN мембраной толщиной 40 нм. В этой мембране методом электронно-лучевого сверления при помощи просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEM-2000F (JEOL, Япония) была сформирована нанопора диаметром ~ 5 нм. Перед экспериментами обе камеры заполняли ультрачистой водой, которую в экспериментах заменяли на чистый 2 ммоль/л ФСБ-Д, содержащий 0,6 моль/л KCl. В одну из камер добавляли раствор цитохрома P450 BM3, лаурат натрия и NADPH до достижения конечных концентраций 10 нмоль/л, 500 мкмоль/л и 200 мкмоль/л, соответственно. После каждого измерения чип промывали ультрачистой водой. В измерениях между объемами камер прикладывали постоянное напряжение – 400 мВ с использованием электродов Ag/AgCl. Ионный ток измеряли в частотном диапазоне 1000 Гц с помощью усилителя с уровнем внутреннего шума $\sim 0,3$ пА и регистрировали с помощью 16-битного аналого-цифрового преобразователя

(АЦП). Сигнал обрабатывали с помощью фильтра Баттерворта с частотой 1 кГц. Детектор был экранирован посредством ячейки Фарадея для предотвращения воздействия на него внешних электромагнитных помех.

Измерения при помощи АСМ. Для исследования поведения цитохрома P450 BM3 на поверхности неорганической подложки фермент адсорбировали на поверхность подложки из свежесколотой слюды из 2 мкл 0,25 мкмоль/л раствора фермента в 10 ммоль/л ФСБ-Д с pH 7,4, который инкубировали на поверхности подложки в течение 3 мин, после чего смывали ультрачистой водой. Подготовленную таким образом подложку помещали в измерительную ячейку высокоскоростного АСМ RIBM (изготовлен проф. Т. Андо, Япония), содержащую 2,5 ммоль/л ФСБ-Д с pH 7,4. АСМ-сканирование проводили в жидкости с использованием зондов NanoWorld с радиусом кривизны менее 10 нм и золотым покрытием (длина балки зонда 2,5 мкм; резонансная частота кантилевера в воздухе и в жидкости $\sim 1,5$ МГц и 0,9 МГц, соответственно; константа жесткости $\sim 0,6$ Н/м).

Спектрофотометрические измерения. Активность цитохром P450 BM3 в реакции гидроксирования лаурата определяли по методике, разработанной Neeli et al. [10], при помощи спектрофотометра модели 8453 (Agilent Deutschland GmbH, ФРГ). В экспериментах 2 мкл 50 мкмоль/л сток-раствора фермента пипетировали в кварцевую кювету объемом 3 мл с длиной оптического пути 1 см, содержащую 500 мкмоль/л лаурата натрия в 50 ммоль/л фосфатном буферном растворе с pH 7,0, и тщательно перемешивали. После этого в кювету пипетировали раствор NADPH в том же буферном растворе так, что конечная концентрация NADPH в кювете составляла 200 мкмоль/л [10], и сразу же начинали регистрацию зависимости поглощения раствора в кювете от времени. Измерения проводили при длине волны 340 нм в течение 600 с при температуре 25 °С.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим поведение фермента в процессе катализируемой им реакции. На рис. 1 представлены типичные зависимости поглощения реакционного раствора при длине волны 340 нм (A_{340}) (слева) и ионного тока (I)

(справа) от времени (t), полученные при наблюдении за процессом ферментативной реакции методом СФ и при помощи ЭНПД, соответственно.

Зависимость $A_{340}(t)$, иллюстрирующая кинетику расходования NADPH в процессе ферментативной реакции [10] и показанная на рис. 1, подтверждает, что в экспериментальных условиях функциональная активность исследуемого фермента была вполне достаточной для осуществления ферментативного процесса. В самом деле, значение активности цитохрома P450 BM3, определенное по результатам наших экспериментов, составило 20 с^{-1} . Это значение хорошо соотносится с таковым, полученным Neeli et al. в тех же экспериментальных условиях ($50 \pm 2 \text{ с}^{-1}$ [10]). Необходимо подчеркнуть, что ферментативная реакция гидроксирования лаурата в присутствии цитохрома P450 BM3 протекает лишь в присутствии донора электронов – NADPH [10]. Характерные пики с амплитудой

2–3 пА, свидетельствующие о флуктуациях встроенной в нанопору макромолекулы фермента в процессе катализа [6], наблюдаются на кривой зависимости $I(t)$ лишь при условии присутствия в камере измерительной ячейки всех компонентов реакционной смеси и не наблюдаются в отсутствие NADPH. Отметим, что характерные пики наблюдаются на кривой $I(t)$ в течение не менее 1200 с, что свидетельствует о сохранении этой молекулой активности в течение этого периода времени.

Как отмечено во введении, АСМ позволяет наблюдать за поведением биологических макромолекул на поверхности твердых неорганических подложек [13]. В наших экспериментах на АСМ при сканировании в жидкости (буферном растворе с pH 7,4) было обнаружено, что макромолекулы фермента перемещаются вдоль поверхности подложки, т. е. наблюдался процесс поверхностной диффузии [13]. АСМ-изображения, представленные на рис. 2, иллюстрируют этот факт.

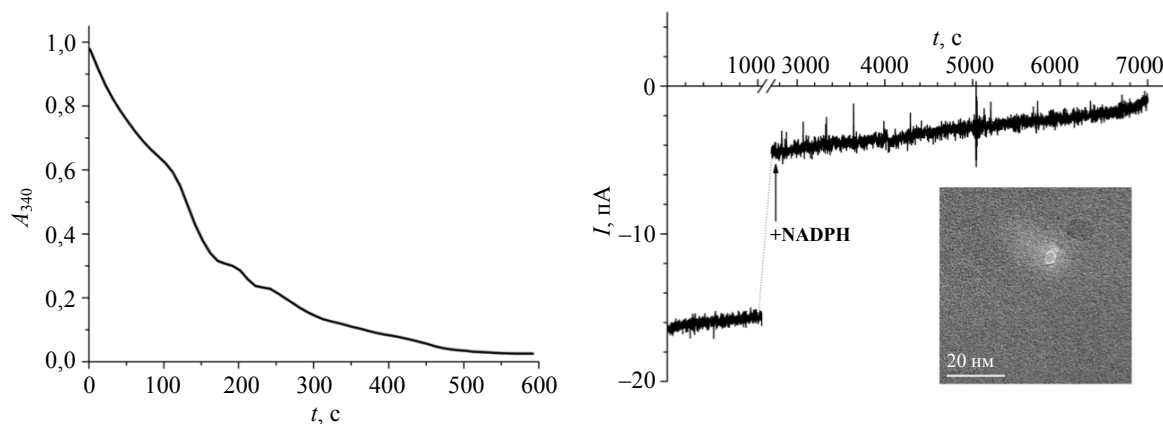


Рис. 1. Зависимости $A_{340}(t)$ (слева) и $I(t)$ (справа), полученные при наблюдении за процессом ферментативной реакции методом СФ и при помощи ЭНПД, соответственно. На вставке представлено ПЭМ-изображение нанопоры ЭНПД



Рис. 2. АСМ-изображения макромолекул BM3 в жидкости, последовательно полученные на высокоскоростном АСМ. Время на кадр 1 с. Область сканирования $200 \times 200 \text{ нм}$. Шкала высот от 0 до 4,5 нм. Кадры получены в моменты времени 0 с (слева), 23 с (в центре) и 60 с (справа)

Отметим, что на поверхности слюды экспонированы силанольные (Si-OH) группы [14]. Эти же группы присутствуют на поверхности материала мембраны (Si₃N₄) [15]. Следовательно, можно ожидать, что поведение молекул исследуемого фермента на поверхности мембраны с нанопорой сходно с его поведением на поверхности слюды, визуализированным посредством АСМ в растворе с тем же значением pH, при котором проводили эксперименты на ЭНПД. Из этого можно сделать вывод о том, что процесс поверхностной диффузии молекул фермента может оказывать влияние на их транспорт по направлению к нанопоре и встраивание в нее.

Заключение

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность использования ЭНПД для наблюдения за поведением единичной молекулы цитохрома P450 BM3 в процессе реакции гидроксирования лаурата, катализируемой этой молекулой. Активность фермента в исследуемой реакции подтверждена методом СФ. Методом АСМ визуализирован процесс поверхностной диффузии молекул фермента на неорганической подложке, который может оказывать влияние на их транспорт по направлению к нанопоре и встраивание в нее.

Измерения на ЭНПД и АСМ выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) (№ 122030100168-2). Эксперименты методом СФ

выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-26-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov Y. D., Bukharina N. S., Shumov I. D., Afonin O. N., Tatur V. Y., Grudo A. V., Archakov A. I. / Biosensors 2025. Vol. 15. № 5. P. 303.
2. Ivanov Y. D., Pleshakova T. O., Shumov I. D., Kozlov A. F., Ivanova I. A., Valueva A. A., Tatur V. Y., Smelev M. V., Ivanova N. D., Ziborov V. S. / Sci. Rep. 2020. Vol. 10. P. 9022.
3. Meyer N., Abrao-Nemeir I., Janot J.-M., Torrent J., Lepoitevin M., Balme S. // Adv. Colloid. Interface Sci. 2021. Vol. 298. P. 102561.
4. Tan S. W., Gu D. J., Liu H., Liu Q. J. / Nanotechnology 2016. Vol. 27. P. 155502.
5. Chau C. C. C., Weckman N. E., Thomson E., Actis P. / ACS Nano. 2025. Vol. 19. P. 3839–3851.
6. Ivanov Y. D., Ableev A. N., Shumov I. D., Ivanova I. A., Vaulin N. V., Lebedev D. V., Bukatin A. S., Mukhin I. S., Archakov A. I. / Int. J. Mol. Sci. 2023. Vol. 24. P. 15636.
7. Мецлер Д. Биохимия. – М.: Мир, 1980.
8. Xie X. S., Lu H. P. / J. Biol. Chem. 1999. Vol. 274. № 23. P. 15967–15970.
9. Castronovo M., Lucesoli A., Parisse P., Kurnikova A., Malhotra A., Grassi M., Grassi G., Scaggiante B., Casalis L., Scoles G. / Nat. Commun. 2010. Vol. 2. P. 297.
10. Neeli R., Girvan H. M., Lawrence A., Warren M. J., Leys D., Scrutton N. S., Munro A. W. / FEBS Lett. 2005. Vol. 579. P. 5582–5588.
11. Narhi L. O., Fulco A. J. / J. Biol. Chem. 1986. Vol. 261. № 16. P. 7160–7169.
12. Esteves F., Rueff J., Kranendonk M. / J. Xenobiot. 2021. Vol. 11. P. 94–114.
13. Yamamoto D., Uchihashi T., Kodera N., Yamashita H., Nishikori S., Ogura T., Shibata M., Ando T. / Meth. Enzymol. 2010. Vol. 475. P. 541–564.
14. Shinohara K., Makida Y. / Sci. Rep. 2018. Vol. 8. P. 13982.
15. Antoniou M., Tsounidi D., Petrou P. S., Beltsios K. G., Kakabakos S. E. / Med. Devices Sens. 2020. Vol. 3. P. e10072.

Nanotechnology-based sensors for monitoring single molecules of cytochrome P450 BM3

I. D. Shumov^{1*}, V. S. Ziborov^{1,2}, A. N. Ableev¹, A. V. Vinogradova¹, O. N. Afonin¹, N. S. Bukharina¹, N. V. Vaulin³, D. V. Lebedev³, A. S. Bukatin³, I. S. Mukhin³, I. N. Saraeva⁴, A. I. Archakov¹, and Yu. D. Ivanov^{1,2}

¹ Institute of Biomedical Chemistry (IBMC), Moscow, 119121 Russia

* E-mail: shum230988@yandex.ru

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT), Moscow, 125412 Russia

³ Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia

⁴ P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

Received 25.12.2025; revised 30.01.2026; accepted 27.04.2026

Nanotechnology-based sensors – an electrical nanopore detector (ENPD) and an atomic force microscope (AFM) – were used to monitor the behaviour of single molecules of cytochrome P450 BM3 enzyme. An ENPD, based on a solid-state nanopore formed in silicon nitride, has been used to monitor the functional activity of P450 BM3 in the reaction of laurate hydroxylation in the presence of NADPH. The functional activity of the studied enzyme has been confirmed by spectrophotometry. Using AFM, the dynamics of the enzyme molecules on the surface of an inorganic substrate has been visualized. The obtained results clearly demonstrate the potential of using nanotechnology-based detectors to determine the physicochemical properties of enzymes at the single-molecule level, thus gaining a deeper understanding of the fundamental principles of functioning of enzyme systems.

Keywords: cytochrome P450, solid-state nanopore, enzymatic activity, atomic force microscopy, spectrophotometry.

REFERENCES

1. Ivanov Y. D., Bukharina N. S., Shumov I. D., Afonin O. N., Tatur V. Y., Grudo A. V., and Archakov A. I., *Bio-sensors* **15** (5), 303 (2025).
2. Ivanov Y. D., Pleshakova T. O., Shumov I. D., Kozlov A. F., Ivanova I. A., Valueva A. A., Tatur V. Y., Sme-lov M. V., Ivanova N. D., and Ziborov V. S., *Sci. Rep.* **10**, 9022 (2020).
3. Meyer N., Abrao-Nemeir I., Janot J.-M., Torrent J., Lepoitevin M., and Balme S., *Adv. Colloid. Interface Sci.* **298**, 102561 (2021).
4. Tan S. W., Gu D. J., Liu H., and Liu Q. J., *Nanotechnology* **27**, 155502 (2016).
5. Chau C. C. C., Weckman N. E., Thomson E., and Actis P., *ACS Nano* **19**, 3839–3851 (2025).
6. Ivanov Y. D., Ableev A. N., Shumov I. D., Ivanova I. A., Vaulin N. V., Lebedev D. V., Bukatin A. S., Mukhin I. S., and Archakov A. I., *Int. J. Mol. Sci.* **24**, 15636 (2023).
7. Metzler D. E. *Biochemistry, the Chemical Reactions of Living Cells*, 1st ed., Academic Press, Cambridge, UK, 1977; Moscow, Mir, 1980.
8. Xie X. S. and Lu H. P., *J. Biol. Chem.* **274** (23), 15967–15970 (1999).
9. Castronovo M., Lucesoli A., Parisse P., Kurnikova A., Malhotra A., Grassi M., Grassi G., Scaggiante B., Casalis L., and Scoles G., *Nat. Commun.* **2**, 297 (2010).
10. Neeli R., Girvan H. M., Lawrence A., Warren M. J., Leys D., Scrutton N. S., and Munro A. W., *FEBS Lett.* **579**, 5582–5588 (2005).
11. Narhi L. O. and Fulco A. J., *J. Biol. Chem.* **261** (16), 7160–7169 (1986).
12. Esteves F., Rueff J., and Kranendonk M. J., *Xenobiot.* **11**, 94–114 (2021).
13. Yamamoto D., Uchihashi T., Koderia N., Yamashita H., Nishikori S., Ogura T., Shibata M., and Ando T., *Meth. Enzymol.* **475**, 541–564 (2010).

14. Shinohara K. and Makida Y., Sci. Rep. **8**, 13982 (2018).

15. Antoniou M., Tsounidi D., Petrou P. S., Beltsios K. G., and Kakabakos S. E., Med. Devices Sens. **3**, e10072 (2020).

Об авторах

Шумов Иван Дмитриевич, к.б.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: shum230988@yandex.ru SPIN-код: 3827-1620, AuthorID: 484732, ORCID: 0000-0002-9795-7065

Зиборов Вадим Серафимович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8); Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: ziborov.vs@yandex.ru AuthorID: 31839, ORCID: 0000-0001-7942-3337

Аблеев Александр Нариманович, ведущий инженер, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: ableev@mail.ru SPIN-код: 1193-5666; AuthorID: 1293547, ORCID: 0009-0004-3096-107X

Виноградова Ангелина Владимировна, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: angeluna1234@bk.ru SPIN-код: 3979-1650, AuthorID: 1217129, ORCID: 0009-0001-6044-3490

Афонин Олег Николаевич, к.т.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: sunweb@mail.ru SPIN-код: 1767-5835, AuthorID: 167545, ORCID: 0009-0008-7947-3674

Бухарина Наталья Сергеевна, к.б.н., младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: natalia.bukho@gmail.com SPIN-код: 8280-6076, AuthorID: 609294

Ваулин Никита Васильевич, лаборант, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: nikitavaylin@mail.ru SPIN-код: 7466-5599, AuthorID: 1212356, ORCID: 0000-0001-6080-0729

Лебедев Денис Владимирович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: denis.v.lebedev@gmail.com SPIN-код: 8079-9286, AuthorID: 751908, ORCID: 0000-0001-5389-2899

Букатин Антон Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: antbuk.fiztek@gmail.com SPIN-код: 4604-0330, AuthorID: 744078 ORCID: 0000-0002-5459-1438

Мухин Иван Сергеевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: imukhin@yandex.ru SPIN-код: 3242-8122, AuthorID: 546023, ORCID: 0000-0001-9792-045X

Сараева Ирина Николаевна, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) (119333, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53). E-mail: saraevain@lebedev.ru SPIN-код: 1795-7758, AuthorID: 889405, ORCID: 0000-0003-2362-023X

Арчаков Александр Иванович, д.б.н., Академик РАН, профессор, научный руководитель, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: alexander.archakov@ibmc.msk.ru SPIN-код: 9412-0222, AuthorID: 78435, ORCID: 0000-0002-2290-8090

Иванов Юрий Дмитриевич, д.б.н., профессор, зав. лабораторией, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8); Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: yurii.ivanov.nata@gmail.com SPIN-код: 7935-0461, AuthorID: 78445, ORCID: 0000-0001-5041-1914