

Научная статья

УДК 577.3

DOI: 10.18384/2949-5067-2025-1-40-51

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ МОЛЕКУЛ ПЕРОКСИДАЗЫ ХРЕНА

Иванов Ю. Д.^{1,2}, Аблеев А. Н.¹, Шумянцева В. В.¹, Шумов И. Д.^{1}, Зиборов В. С.^{1,2},
Неведрова Е. Д.¹, Виноградова А. В.¹, Иванова И. А.¹, Ваулин Н. В.³, Лебедев Д. В.³,
Букатин А. С.³, Мухин И. С.³, Сараева И. Н.⁴, Апель П. Ю.⁵, Юшков Е. С.⁶, Арчаков А. И.¹*

¹Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича, г. Москва, Российская Федерация

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

⁵Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл., Российская Федерация

⁶Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

*Корреспондирующий автор, e-mail: shum230988@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.02.2025

Принята к публикации 25.02.2025

Аннотация

Цель. Определение каталитической активности единичной молекулы пероксидазы хрена (ПХ) в реакции окисления субстрата 2,2'-азино-бис-[3-этилбензтиазолин-6-сульфоната] (АБТС) пероксидом водорода.

Процедура и методы. Для определения (мониторинга) каталитической активности ПХ использовали поровую технологию, что позволило провести анализ активности единичной молекулы ПХ без введения в систему дополнительных компонентов для усиления сигнала. Для этого использовали твердотельную пору размером около 5 нм, сформированную методом электронно-лучевого сверления в пластине нитрида кремния толщиной ~40 нм. Молекула ПХ была встроена в эту пору, после чего проводили анализ каталитической активности встроеной в пору молекулы, в присутствии АБТС и H₂O₂ путём измерения ионного тока, протекающего через пору со встроеной в неё молекулой ПХ.

© СС ВУ Иванов Ю. Д., Аблеев А. Н., Шумянцева В. В., Шумов И. Д., Зиборов В. С., Неведрова Е. Д., Виноградова А. В., Иванова И. А., Ваулин Н. В., Лебедев Д. В., Букатин А. С., Мухин И. С., Сараева И. Н., Апель П. Ю., Юшков Е. С., Арчаков А. И., 2025.

Результаты. Мониторинг каталитической активности ПХ в реакции окисления АБТС был проведён путём регистрации ионного тока, протекающего через пору.

Теоретическая и/или практическая значимость. Было показано, что изготовленная пора может быть использована для мониторинга каталитической активности ПХ. Полученные результаты важны для развития работ в области исследования ферментов на уровне единичных молекул.

Ключевые слова: каталитическая активность, пероксидаза хрена, фермент

Благодарности и источники финансирования. Эксперименты по определению активности фермента выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) (№ 122030100168-2). Авторы выражают благодарность ОИВТ РАН за подготовку образцов. Работа по подготовке образцов была выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00).

Для цитирования:

Использование искусственных твердотельных пор для измерения каталитической активности отдельных молекул пероксидазы хрена / Ю. Д. Иванов, А. Н. Аблеев, В. В. Шумянцева, И. Д. Шумов, В. С. Зиборов, Е. Д. Неведрова, А. В. Виноградова, И. А. Иванова, Н. В. Ваулин, Д. В. Лебедев, А. С. Букатин, И. С. Мухин, И. Н. Сараева, П. Ю. Апель, Е. С. Юшков, А. И. Арчаков // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2025. № 1. С.40–51. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-1-40-51>

Original research article

THE USE OF ARTIFICIAL SOLID-STATE PORES FOR MEASUREMENT OF CATALYTIC ACTIVITY OF INDIVIDUAL MOLECULES OF HORSE RADISH PEROXIDASE

Yu. Ivanov^{1,2}, A. Ableev¹, V. Shumyantseva¹, I. Shumov^{1}, V. Ziborov^{1,2}, E. Nevedrova¹, A. Vinogradova¹, I. Ivanova¹, N. Vaulin³, D. Lebedev⁴, A. Bukatin⁵, I. Mukhin⁶, I. Saraeva¹, P. Apeľ⁶, E. Yushkov⁶, A. Archakov¹*

¹*Institute of Biomedical Chemistry, Moscow, Russian Federation*

²*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

³*Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation*

⁴*P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

⁵*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region, Russian Federation*

⁶*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation*

**Corresponding author, e-mail: shum230988@yandex.ru*

Received by the editorial office 21.02.2025

Accepted for publication 25.02.2025

Abstract

Aim. Determination of the catalytic activity of a single molecule of horseradish peroxidase (HRP) in the oxidation reaction of the substrate 2,2'-azino-bis-[3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonate] (ABTS) with hydrogen peroxide.

Methodology. To determine (monitor) the catalytic activity of HRP, pore technology has been used; it has allowed us to analyze the activity of a single HRP molecule without introducing additional components into the system to enhance the signal. For this purpose, a solid-state pore of about 5 nm in size, formed by electron-beam drilling in a silicon nitride plate of ~40 nm thickness, has been used. A HRP molecule has been embedded in this pore, after which the catalytic activity of the molecule embedded in the pore in the presence of ABTS and H₂O₂ has been analyzed by measuring the ion current through the pore with the HRP molecule embedded in it.

Results. A pore detector has been proposed to study the catalytic activity of HRP in the reaction of ABTS oxidation. It has been found that this detector made it possible to monitor the activity of this enzyme by registering of ion current through the pore.

Research implications. It has been shown that the manufactured pore can be used to monitor HRP activity. The results obtained are important for the development of work in the field of enzyme research at the level of single molecules.

Keywords: enzyme, horseradish peroxidase, catalytic activity.

Acknowledgments: The experiments on determination of the enzyme activity were performed within the framework of the Program for Basic Research in the Russian Federation for a long-term period (2021-2030) (No. 122030100168-2). The authors express their gratitude to Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences for sample preparation. The work on sample preparation was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. 075-00269-25-00).

For citation:

Ivanov, Yu. D., Ableev, A. N., Shumyantseva, V. V., Shumov, I. D., Ziborov, V. S., Nevedrova, E. D., Vinogradova, A. V., Ivanova, I. A., Vaulin, N. V., Lebedev, D. V., Bukatin, A. S., Mukhin, I. S., Saraeva, I. N., Apel, P. Y., Yushkov, E. S. & Archakov, A. I. (2025). The use of artificial solid-state pores for measurement of catalytic activity of individual molecules of horseradish peroxidase. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 1, 40–51. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-1-40-51>

Введение

В последнее время для измерения активности единичных молекул используется метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) [1–3]. Он позволяет регистрировать активность единичной молекулы фермента по мониторингу осцилляции зонда атомно-силового микроскопа. Однако для реализации этого метода необходимо дорогое оборудование. К другим методам регистрации функционирования единичных молекул ферментов относится использование природных пор [4–9]. Однако методы на основе природных пор имеют ограничения по размерам пор, что не даёт возможности их использования для регистрации широкого класса ферментов. Подход с использованием искусственных твёрдотельных пор снимает этот недостаток, так как можно синтезировать поры разного диаметра.

Ферментные каталитические системы играют важнейшую роль в различных метаболических процессах. Фермент (белок, обладающий каталитической активностью) пероксидаза хрена (ПХ) выбран в нашей работе для исследования, т. к. этот фермент часто используется в качестве модельного объекта при исследованиях широкого класса пероксидаз и является хорошо изученным ферментом. Пероксидаза участвует в каталитическом окислении

широкого класса органических и неорганических соединений пероксидом водорода (H_2O_2) [10]. Молекулярная масса ПХ составляет около 40 кДа [11]. Определение каталитической активности ПХ может проводиться с помощью характерной реакции с использованием 2,2'-азино-бис-[3-этилбензтиазолин-6-сульфоната] (АБТС) и H_2O_2 , как описано в [12].

В нашей работе с помощью электронного микроскопа были изготовлены поры в SiN размером порядка 5 нм. В такой поре иммобилизовали фермент ПХ, и проводили реакцию окисления АБТС пероксидом водорода H_2O_2 . Был осуществлён мониторинг изменения ионного тока, протекающего через пору с этим ферментом в процессе функционирования этого фермента.

Материалы и методы

Реактивы

Фосфатно-солевой буферный раствор в модификации Дульбекко (буфер ФСБ-Д) с концентрацией 2 ммоль/л по фосфат-иону (рН 7.6) готовили из смеси солей, полученной из Pierce (США).

Во всех экспериментах использовали бидистиллированную деионизованную воду, полученную на установке Millipore (США).

Фермент ПХ и субстрат АБТС были получены из Sigma (США).

В экспериментах ПХ использовали в виде раствора в ФСБ-Д.

Раствор АБТС (0,3 ммоль/л АБТС в 2 ммоль/л ФСБ-Д (рН 7.4)) готовили путём растворения АБТС в этом буфере непосредственно перед экспериментом.

Раствор H_2O_2 разбавляли в 2 ммоль/л ФСБ-Д до концентрации 0,003%.

Поровый детектор

Пору формировали в пластине (чипе) SiN толщиной порядка 40 нм с использованием просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения (JEM 2100f). Диаметр сформированной поры составлял порядка 5 нм. Для изготовления порового детектора SiN-чип со сформированной в нём порой устанавливали в крепёжное место между двумя резервуарами (цис- и транс-) и промывали бидистиллированной деионизованной водой непосредственно перед измерениями.

Два резервуара (цис- и транс-) измерительной ячейки заполняли 700 мкл 1 ммоль/л ФСБ-Д (рН 7.4). Ag/AgCl электроды были вмонтированы для измерения ионного тока, протекающего через пору. Детектор был экранирован с помощью ячейки Фарадея. Для измерений I (ионного тока, протекающего через пору) использовали патч-кламп усилитель с уровнем собственного шума 0,3 фА в полосе частот 1000 Гц. Напряжение изменяли в пределах от -300 до 300 мВ. Регистрация сигнала от поры проводилась с частотой 10 кГц с помощью 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Далее сигнал подвергали цифровой фильтрации с помощью низкочастотного фильтра Баттерфорта с частотой среза 1000 Гц. При необходимости после

измерения чип промывали деионизованной водой для удаления остатков соли и снова устанавливали в измерительную ячейку.

Эксперимент

Сначала, непосредственно перед измерениями, SiN-чип промывали бидистиллированной деионизованной водой, после чего в обе камеры измерительной ячейки вносили 1 ммоль/л ФСБ-Д буфер и записывали нулевой сигнал.

В холостых опытах исследовали зависимость ионного тока от времени при напряжении -200 мВ, когда в цис-камеру добавляли чистый буфер, а затем добавляли АБТС до концентрации последнего $0,3$ ммоль/л. После этого половину объёма раствора откачивали из цис-камеры и туда добавляли раствор H_2O_2 . При этом не было отмечено существенных изменений флуктуаций ионного тока. После этого проводили рабочие эксперименты, в которых в цис-камеру измерительной ячейки вносили 10^{-8} моль/л раствор ПХ в 2 ммоль/л ФСБ-Д (рис. 1).

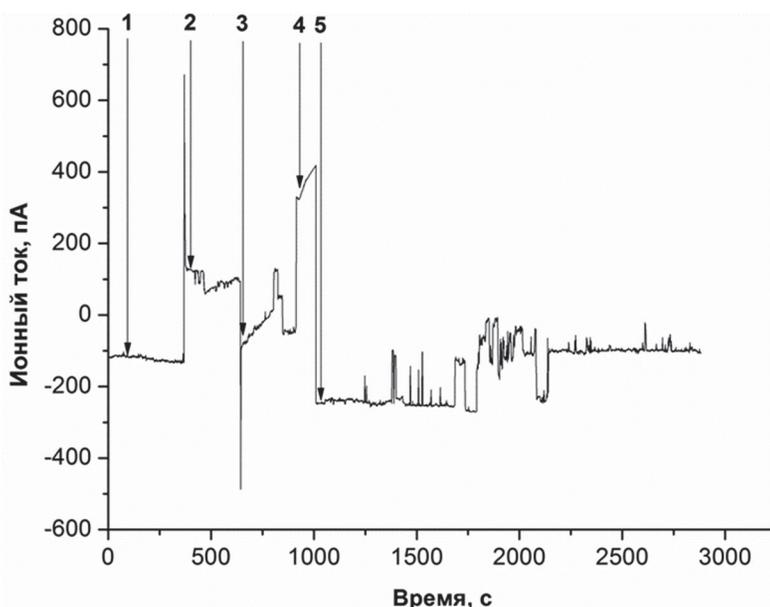


Рис. 1 / Fig. 1. Зависимость ионного тока через пору от времени. Стрелками показаны: (1) – добавление раствора ПХ с концентрацией 10^{-8} моль/л, напряжение $U=-200$ мВ; (2) – переключение полярности напряжения на $U=200$ мВ; (3) – переключение полярности напряжения на $U=-200$ мВ; (4) – добавление АБТС, напряжение $U=-200$ мВ; (5) – добавление H_2O_2 , напряжение $U=-200$ мВ. Обозначения: ось X – время (сек), ось Y – ионный ток через пору (пА) / Time dependence of the ion current through the pore. Arrows indicate: (1) – addition of HRP solution with a concentration of 10^{-8} mol/l, voltage $U=-200$ mV; (2) – switching the voltage polarity to $U=200$ mV; (3) – switching the voltage polarity to $U=-200$ mV; (4) – addition of ABTS, voltage $U=-200$ mV; (5) – addition of H_2O_2 , voltage $U=-200$ mV. Designations: X-axis – time (sec), Y-axis – ion current through the pore (pA)

Из рис. 1 видно, что для концентрации ПХ $C=10^{-8}$ моль/л при поданном напряжении на цис-ячейку относительно транс-ячейки $U=-200$ мВ наблюдался ионный ток через пору ~ -100 пА. Затем было переключено напряжение: на цис-камеру подавалось напряжение другой полярности $U=200$ мВ. Как видно, при этом ионный ток через пору менял свой знак и достигал порядка 100 пА. Затем опять меняли полярность в ячейке и устанавливали $U=-200$ мВ. При этом наблюдалось закрывание поры, так как ионный ток через пору приближался к 0. Затем ячейка заполнялась раствором АБТС, что вызывало изменения сигнала в сторону его увеличения, после этого добавляли H_2O_2 для запуска реакции окисления АБТС. При этом наблюдалась серия флуктуаций сигнала с существенными колебаниями уровня. Эти существенные колебания были присущи работе фермента в течение порядка 1800 секунд.

Обсуждение

В работе было проведено исследование возможности использования поры для анализа активности фермента. Для этого в пору была встроена молекула фермента ПХ и далее наблюдалась зависимость флуктуации ионного тока от времени во время каталитического цикла. За время каталитического цикла наблюдались импульсы ионного тока, которые характеризовали изменения размера поры, за счёт изменения формы фермента, встроенного в пору. Эти флуктуации ионного тока наблюдались достаточно долго в течение 1800 секунд за это время фермент всё ещё продолжал функционировать. Таким образом, показано, что единичные молекулы фермента могут сохранять каталитическую активность на протяжении порядка 0,5 часа. Холостые опыты в отсутствие фермента показали, что не наблюдалось существенных флуктуаций ионного тока, когда в измерительной ячейке отсутствует фермент, а присутствуют только АБТС и H_2O_2 . Полученные результаты важны для понимания функционирования ферментов и могут быть использованы для анализа их работы на уровне единичной молекулы.

Заключение

В работе была использована пора с размером порядка 5 нм, что позволило иммобилизовать в ней ПХ. Проведённые эксперименты показали, что такая пора с иммобилизованным ПХ может быть использована для мониторинга каталитической активности этого фермента в присутствии АБТС и H_2O_2 . В процессе функционирования фермента наблюдалась флуктуация ионного тока в течение 1800 секунд, которые не наблюдались в отсутствие АБТС и H_2O_2 . Полученные результаты имеют большое значение для выяснения механизма функционирования ферментов на уровне единичных молекул.

ЛИТЕРАТУРА

1. АСМ-визуализация, измерение активности и физико-химических свойств единичных мономеров и олигомеров ферментов / Ю. Д. Иванов, Н. С. Бухарина,

- Т. О. Плешакова, П. А. Французов, Н. В. Крохин, В. С. Зиборов, А. И. Арчаков // *Биофизика*. 2011. Т. 56. № 5. С. 939–944.
2. АСН-нанотехнология для визуализации, счёта, определения упругости и активности единичных белков цитохром Р 450-содержащих монооксигеназных систем / Ю. Д. Иванов, Н. С. Бухарина, П. А. Французов, Т. О. Плешакова, А. В. Мунро, Г. Хуэй Бон Хоа, А. И. Арчаков // *Нанотехнологии и охрана здоровья*. 2010. Т. 2. № 1. С. 30–35.
 3. Direct Observation of enzyme activity with the atomic force microscope / M. Radmacher, M. Fritz, H. G. Hansma, P. K. Hansma // *Science*. 1994. Vol. 265. Iss. 5178. P. 1577–1579. DOI: 10.1126/science.8079171.
 4. Measuring enzymatic activities with nanopores / Y. Sheng, S. Zhang, L. Liu, H.-C. Wu // *ChemBioChem*. 2020. Vol. 21. Iss. 15. P. 2089–2097. DOI: 10.1002/cbic.202000079.
 5. Nanopore-based measurement of the interaction of P450cam monooxygenase and putidaredoxin at the single-molecule level / H. Chen, Y. Lin, Y.-T. Long, S. D. Minter, Y.-L. Ying // *Faraday Discussions*. 2022. Vol. 233. P. 295–302. DOI: 10.1039/d1fd00042j.
 6. Single-molecule nanopore enzymology / K. Willems, V. van Meervelt, C. Wloka, G. Maglia // *Philosophical transactions of the Royal Society B, Biological sciences*. 2017. Vol. 372. Iss. 1726. Article no. 20160230. DOI: 10.1098/rstb.2016.0230.
 7. Label-free and real-time detection of protein ubiquitination with a biological nanopore / C. Wloka, V. van Meervelt, D. V. Gelder, N. Danda, N. Jager, C. P. Williams, G. Maglia // *ACS Nano*. 2017. Vol. 11. Iss. 5. P. 4387–4394. DOI: 10.1021/acsnano.6b07760.
 8. A nanopore approach for analysis of caspase-7 activity in cell lysates / B. Pham, S. J. Eron, M. E. Hill, Xin Li, M. A. Fahie, J. A. Hardy, Min Chen // *Biophysical Journal*. 2019. Vol. 117. Iss. 5. P. 844–855. DOI: 10.1016/j.bpj.2019.07.045.
 9. A selective activity-based approach for analysis of enzymes with an OmpG nanopore / M. A. Fahie, B. Pham, F. Li, M. Chen // *Methods in Molecular Biology*. 2021. Vol. 2186. P. 115–133. DOI: 10.1007/978-1-0716-0806-7_9.
 10. Рогожин В. В., Кутузова Г. Д., Угарова Н. Н. Ингибирование пероксидазы хрена N-этиламидом о-сульфобензоилуксусной кислоты // *Биоорганическая химия*. 2000. Т. 26. № 2. С. 156–160.
 11. Davies P. F., Rennke H. G., Cotran, R. S. Influence of molecular charge upon the endocytosis and intracellular fate of peroxidase activity in cultured arterial endothelium // *Journal of Cell Science*. 1981. Vol. 49. Iss. 1. P. 69–86. DOI: 10.1242/jcs.49.1.69.
 12. Sander S. A., Bray R. C., Smith A. T. pH-dependent properties of a mutant horseradish peroxidase isoenzyme C in which Arg38 has been replaced with lysine // *European Journal of Biochemistry*. 1994. Vol. 224. Iss. 3. P. 1029–1037. DOI: 10.1111/j.1432-1033.1994.01029.x.

REFERENCES

1. Ivanov, Y. D., Bukharina, N. S., Pleshakova, T. O., Frantsuzov, P. A., Krokhin, N. V., Ziborov, V. S. & Archakov, A. I. (2011). Atomic force microscopy visualization and measurement of the activity and physicochemical properties of single monomeric and oligomeric enzymes. In: *Biophysics*, 56 (5), 939–944 (in Russ.).
2. Ivanov, Y. D., Bukharina, N. S., Frantsuzov, P. A., Pleshakova, T. O., Munro, A. V., Hui Bon Hoa, G. & Archakov, A. I. (2010). ASN-nanotechnology for visualization, counting, determination of elasticity and activity of single proteins of cytochrome P 450-containing

- monooxygenase systems. In: *Nanotechnology and Health Protection*, 2 (1), 30–35 (in Russ.).
3. Radmacher, M., Fritz, M., Hansma, H. G. & Hansma, P. K. (1994). Direct Observation of enzyme activity with the atomic force microscope. In: *Science*, 265 (5178), 1577–1579. DOI: 10.1126/science.8079171.
 4. Sheng, Y., Zhang, S., Liu, L. & Wu, H.-C. (2020). Measuring enzymatic activities with nanopores. In: *ChemBioChem*, 21 (15), 2089–2097. DOI: 10.1002/cbic.202000079.
 5. Chen, H., Lin, Y., Long, Y.-T., Minter, S. D. & Ying, Y.-L. (2022). Nanopore-based measurement of the interaction of P450cam monooxygenase and putidaredoxin at the single-molecule level. In: *Faraday Discussions*, 233, 295–302. DOI: 10.1039/d1fd00042j.
 6. Willems, K., van Meervelt, V., Wloka, C. & Maglia, G. (2017). Single-molecule nanopore enzymology. In: *Philosophical transactions of the Royal Society B, Biological sciences*, 372 (1726), 20160230. DOI: 10.1098/rstb.2016.0230.
 7. Wloka, C., van Meervelt, V., Gelder, D. V., Danda, N., Jager, N., Williams, C. P. & Maglia, G. (2017). Label-free and real-time detection of protein ubiquitination with a biological nanopore. In: *ACS Nano*, 11 (5), 4387–4394. DOI: 10.1021/acsnano.6b07760.
 8. Pham, B., Eron, S. J., Hill, M. E., Xin, Li, Fahie, M. A., Hardy, J. A. & Chen, Min (2019). A nanopore approach for analysis of caspase-7 activity in cell lysates. In: *Biophysical Journal*, 117 (5), 844–855. DOI: 10.1016/j.bpj.2019.07.045.
 9. Fahie, M. A., Pham, B., Li, F. & Chen, M. (2021). A selective activity-based approach for analysis of enzymes with an OmpG nanopore. In: *Methods in Molecular Biology*, 2186, 115–133. DOI: 10.1007/978-1-0716-0806-7_9.
 10. Rogozhin, V. V., Kutuzova, G. D. & Ugarova, N. N. (2000). Inhibition of horseradish peroxidase by W-ethylamide of o-sulfobenzoylacetic acid. In: *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 26 (2), 156–160 (in Russ.).
 11. Davies, P. F., Rennke, H. G. & Cotran R. S. (1981). Influence of molecular charge upon the endocytosis and intracellular fate of peroxidase activity in cultured arterial endothelium. In: *Journal of Cell Science*, 49 (1), 69–86. DOI: 10.1242/jcs.49.1.69.
 12. Sander, S. A., Bray, R. C. & Smith, A. T. (1994). pH-dependent properties of a mutant horseradish peroxidase isoenzyme C in which Arg38 has been replaced with lysine. In: *European Journal of Biochemistry*, 224 (3), 1029–1037. DOI: 10.1111/j.1432-1033.1994.01029.x.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Юрий Дмитриевич (г. Москва) – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией нанобиотехнологии Научно-исследовательского института биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича; ведущий научный сотрудник лаборатории № 6.2. – ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
<https://orcid.org/0000-0001-5041-1914>; e-mail: yurii.ivanov.nata@gmail.com

Аблеев Александр Нариманович (г. Москва) – ведущий инженер лаборатории нанобиотехнологии Научно-исследовательского института биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича;
<https://orcid.org/0009-0004-3096-107X>; e-mail: ableev@mail.ru

Шумянцева Виктория Васильевна (г. Москва) – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией биоэлектрохимии Научно-исследовательского института биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича;
<https://orcid.org/0000-0002-1509-7218>; e-mail: v_shumyantseva@mail.ru

Шумов Иван Дмитриевич (г. Москва) – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории нанобиотехнологии Научно-исследовательского института биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича;
<https://orcid.org/0000-0002-9795-7065>; e-mail: shum230988@mail.ru

Зиборов Вадим Серафимович (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 6.2. – ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук; ведущий специалист лаборатории нанобиотехнологии Научно-исследовательского института биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича;
<https://orcid.org/0000-0001-7942-3337>; e-mail: ziborov.vs@yandex.ru

Неведрова Екатерина Дмитриевна (г. Москва) – младший научный сотрудник лаборатории нанобиотехнологии Научно-исследовательского института биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича;
<https://orcid.org/0000-0003-2767-2299>; e-mail: nevedrova.kat@yandex.ru

Виноградова Ангелина Владимировна (г. Москва) – младший научный сотрудник лаборатории нанобиотехнологии Научно-исследовательского института биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича;
<https://orcid.org/0009-0001-6044-3490>; e-mail: angeluna1234@bk.ru

Иванова Ирина Александровна (г. Москва) – младший научный сотрудник лаборатории исследований единичных биомакромолекул Научно-исследовательского института биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича;
<https://orcid.org/0000-0002-2103-2998>; e-mail: i.a.ivanova@bk.ru

Ваулин Никита Васильевич (г. Санкт-Петербург) – лаборант лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук;
<https://orcid.org/0000-0001-6080-0729>; e-mail: nikitavaylin@mail.ru

Лебедев Денис Владимирович (г. Санкт-Петербург) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук;
<https://orcid.org/0000-0001-5389-2899>; e-mail: denis.v.lebedev@gmail.com

Букатин Антон Сергеевич (г. Санкт-Петербург) – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук;
<https://orcid.org/0000-0002-5459-1438>; e-mail: antbuk.fiztek@gmail.com

Мухин Иван Сергеевич (г. Санкт-Петербург) – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук;
<https://orcid.org/0000-0001-9792-045X>; e-mail: imukhin@yandex.ru

Сараева Ирина Николаевна (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины отделения квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук;
<https://orcid.org/0000-0003-2362-023X>; e-mail: saraevain@lebedev.ru;

Апель Павел Юрьевич (г. Дубна, Московская обл.) – доктор химических наук, начальник Центра прикладной физики Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединённого института ядерных исследований;
<https://orcid.org/0000-0003-1259-163X>; e-mail: apel@jinr.ru

Юшков Евгений Семенович (г. Москва) – кандидат технических наук, доцент кафедры № 71 «Экономика и менеджмент в промышленности» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»;
<https://orcid.org/0009-0002-9161-0877>; e-mail: esyushkov@mephi.ru

Арчаков Александр Иванович (г. Москва) – доктор биологических наук, профессор, научный руководитель Научно-исследовательского института биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича; академик РАН;
<https://orcid.org/0000-0002-2290-8090>; e-mail: archak@ibmc.msk.ru;

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri D. Ivanov (Moscow) – Dr. Sci. (Biology), Prof., Laboratory Head, Laboratory of Nanobiotechnology, Institute of Biomedical Chemistry; Leading Researcher, Laboratory No. 6.2. – Shock wave impacts, Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences;
<https://orcid.org/0000-0001-5041-1914>; e-mail: yurii.ivanov.nata@gmail.com

Alexander N. Ableev (Moscow) – Leading Engineer, Laboratory of Nanobiotechnology, Institute of Biomedical Chemistry;
<https://orcid.org/0009-0004-3096-107X>; e-mail: ableev@mail.ru

Victoria V. Shumyantseva (Moscow) – Dr. Sci. (Biology), Prof., Laboratory Head, Laboratory of Bioelectrochemistry, Institute of Biomedical Chemistry;
<https://orcid.org/0000-0002-1509-7218>; e-mail: v_shumyantseva@mail.ru

Ivan D. Shumov (Moscow) – Cand. Sci. (Biology), Researcher, Laboratory of Nanobiotechnology, Institute of Biomedical Chemistry;
<https://orcid.org/0000-0002-9795-7065>; e-mail: shum230988@mail.ru

Vadim S. Ziborov (Moscow) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory No. 6.2. – shock wave impacts, Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences; Leading Specialist, Laboratory of Nanobiotechnology Institute of Biomedical Chemistry;
<https://orcid.org/0000-0001-7942-3337>; e-mail: ziborov.vs@yandex.ru

Ekaterina D. Nevedrova (Moscow) – Research Assistant, Laboratory of Nanobiotechnology, Institute of Biomedical Chemistry;
<https://orcid.org/0000-0003-2767-2299>; e-mail: nevedrova.kat@yandex.ru

Angelina V. Vinogradova (Moscow) – Research Assistant, Laboratory of Nanobiotechnology, Institute of Biomedical Chemistry;
<https://orcid.org/0009-0001-6044-3490>; e-mail: angeluna1234@bk.ru

Irina A. Ivanova (Moscow) – Research Assistant, Laboratory for Research of Single Biomacromolecules, Institute of Biomedical Chemistry;
<https://orcid.org/0000-0002-2103-2998>; e-mail: i.a.ivanova@bk.ru

Nikita V. Vaulin (Saint Petersburg) – Laboratory Assistant, Laboratory for Renewable Energy Sources, Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences;
<https://orcid.org/0000-0001-6080-0729>; e-mail: nikitavaylin@mail.ru

Denis V. Lebedev (Saint Petersburg) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory for Renewable Energy Sources, Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences;
<https://orcid.org/0000-0001-5389-2899>; e-mail: denis.v.lebedev@gmail.com

Anton S. Bukatin (Saint Petersburg) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Senior Researcher, Laboratory for Renewable Energy Sources, Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences;
<https://orcid.org/0000-0002-5459-1438>; e-mail: antbuk.fiztek@gmail.com

Ivan S. Mukhin (Saint Petersburg) – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Laboratory Head, Laboratory for Renewable Energy Sources, Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences;
<https://orcid.org/0000-0001-9792-045X>; e-mail: imukhin@yandex.ru

Irina N. Saraeva (Moscow) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Laboratory for Laser Nanophysics and Biomedicine, Department of Quantum Radiophysics named after N. G. Basov, P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences;
<https://orcid.org/0000-0003-2362-023X>; e-mail: saraevain@lebedev.ru

Pavel Yu. Apel (Dubna, Moscow region) – Dr. Sci. (Chemistry), Head of the Center for Applied Physics, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research;
<https://orcid.org/0000-0003-1259-163X>; e-mail: apel@jinr.ru

Evgeniy S. Yushkov (Moscow) – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Department No. 71 “Economics and Management in Industry”, National Research Nuclear University MEPhI;
<https://orcid.org/0009-0002-9161-0877>; e-mail: esyushkov@mephi.ru

Alexander I. Archakov (Moscow) – Dr. Sci. (Biology), Prof., Scientific Leader, Institute of Biomedical Chemistry, Academician of the Russian Academy of Sciences;
<https://orcid.org/0000-0002-2290-8090>; e-mail: archak@ibmc.msk.ru