

УДК 577.15, 543.55
EDN: NYTMOM

PACS: 87.15.R-

Исследование изменений адсорбционных свойств L-аспарагиназы на слюде при тепловом воздействии для разработки нанопорового детектора

© Е. Е. Важенкова¹, И. Д. Шумов^{1*}, Д. Д. Жданов¹, В. В. Шумянцева¹, В. С. Зиборов²,
А. Н. Аблеев¹, Н. В. Ваулин³, Д. В. Лебедев³, А. С. Букатин³, И. С. Мухин³, О. Н. Афонин¹,
В. Ю. Татур⁴, А. А. Лукьяница^{4,5}, Е. А. Пономаренко¹, А. И. Арчаков¹, Ю. Д. Иванов¹

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

* E-mail: shum230988@yandex.ru

² 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. Алфёрова Российской академии наук» (Алфёровский университет), Санкт-Петербург, 194021 Россия

⁴ Фонд перспективных технологий и новаций, Москва, 125315 Россия

⁵ МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Статья поступила в редакцию 10.03.2026; после доработки 24.03.2026; принята к публикации 5.06.2026
Шифр научной специальности: 1.3.13

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследована адсорбция фермента L-аспарагиназы (L-ASNase) *E. carotovora* на слюду в диапазоне температур от 25 °С до 60 °С. Выявлены термически индуцированные изменения олигомерного состояния L-ASNase и ее адсорбционной способности на слюде. Максимум адсорбции L-ASNase в виде отдельных глобул наблюдается при 45 °С. При 55 °С фермент адсорбируется в виде нитевидных структур, а при 60 °С теряет адсорбционную способность. Полученные результаты принципиально важны для разработки электрических молекулярных детекторов на базе твердотельных нанопор (ЭДТНП), предназначенных для изучения механизма и кинетики ферментативного катализа, а также могут представлять интерес для разработки противораковых препаратов.

Ключевые слова: L-аспарагиназа, атомно-силовая микроскопия, адсорбция ферментов, температурная денатурация, твердотельная нанопора.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-105-111

Введение

Фермент L-аспарагиназа (L-ASNase) относится к гидролазам и катализирует превращение L-аспарагина в аспарат [1]. L-ASNase (II типа) нашла применение в терапии онкологических заболеваний – в частности, лимфобластного лейкоза [2]. Этот фермент также используется в пищевой промышленности для предотвращения либо уменьшения образования акриламида в пищевых продуктах при их

тепловой обработке [3]. В связи с последним, большой интерес представляет исследование эффектов воздействия повышенных температур на физико-химические свойства L-ASNase [3, 4].

Для исследования термостабильности бактериальных L-аспарагиназ II типа в настоящее время повсеместно используются спектроскопические методы [4, 5], не позволяющие получать сигнал от единичных молекул исследуемого фермента [6]. Исследование

физико-химических свойств единичных молекул ферментов, в свою очередь, позволяет глубже изучить кинетику и механизм ферментативного катализа [6]. Для этого используют молекулярные детекторы – атомно-силовой микроскоп и электрические детекторы на базе твердотельных нанопор (ЭДТНП). ЭДТНП позволяют регистрировать каталитическую активность единичных макромолекул ферментов [7], что принципиально важно для изучения кинетики и механизма ферментативного катализа [6, 8]. Отметим, что ключевым элементом ЭДТНП является неорганическая мембрана, часто изготавливаемая на основе соединений кремния [9] с твердотельной нанопорой [7]. Адсорбция исследуемого фермента на поверхность этой мембраны и поведение фермента на этой поверхности могут кардинально влиять на результаты исследования его функционирования с помощью ЭДТНП. Таким образом, принципиально важной задачей является исследование адсорбции ферментов на неорганические кремнийсодержащие поверхности. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет визуализировать единичные макромолекулы ферментов [10, 11] и регистрировать малейшие изменения их адсорбционных свойств. В качестве подложек в АСМ часто используют слюду – соединение кремния, химические свойства поверхности которого сходны с таковыми материалами мембраны ЭДТНП – нитрида кремния Si_3N_4 [12, 13].

Цель настоящего исследования – исследование адсорбции L-ASNase II типа на слюду в условиях теплового воздействия на фермент.

Материалы и методы

Постановка работы. Изменения адсорбционных свойств фермента в зависимости от температуры изучали методом АСМ в диапазоне температур от 25 до 60 °С.

Реактивы и фермент. Фермент L-аспарагиназа *E. carotovora* был получен и очищен в лаборатории медицинской биотехнологии ИБМХ в соответствии с ранее опубликованными протоколами [14]. Лиофилизированный порошок фермента растворяли в 2 ммоль/л фосфатно-буферном растворе модификации Дульбекко (ФСБ-Д) и разбавляли до требуемой в эксперименте концентрации. ФСБ-Д

(рН 7,4; 2 ммоль/л фосфат, 30 ммоль/л NaCl) готовили из смеси солей, приобретенных у компании Pierce (США). Все растворы, использованные в экспериментах, готовили с использованием деионизированной ультрачистой воды (18,2 МОм·см), полученной с помощью установки Simplicity UV (Millipore, Франция).

Атомно-силовая микроскопия. Образцы раствора фермента сначала нагревали в микропробирке до требуемой температуры, а затем фермент адсорбировали из этого раствора на слюдяные подложки для АСМ следующим образом.

Сначала 0,1 мкмоль/л раствор L-ASNase в 2 ммоль/л ФСБ-Д (рН 7,4) помещали в термостатируемый встряхиватель Thermomixer Comfort (Eppendorf, Германия) и последовательно нагревали до требуемых значений температур (25 °С, 30 °С, 45 °С, 55 °С и 60 °С). При каждой из этих температур отбирали две пробы раствора объемом 1 мл, и нагрев продолжали до достижения температуры 60 °С. Затем фермент из образцов, обработанных, как описано выше, адсорбировали методом непосредственной адсорбции [15] на подложки для АСМ из свежесколотой слюды. Каждый образец раствора фермента объемом 1 мл пипетировали в пробирку типа Эппендорф объемом 1,7 мл, и в раствор погружали прямоугольную пластинку слюды сорта мусковит (SPI, США) размером 7×15 мм. Пробирку непрерывно встряхивали со скоростью 600 об/мин при комнатной температуре (25 °С) в течение 10 мин. После этого АСМ-подложку вынимали из раствора фермента, помещали в другую пробирку с 1 мл воды и снова встряхивали при 600 об/мин и комнатной температуре (25 °С) в течение 10 мин для удаления буферных солей с ее поверхности. Все измерения методом АСМ выполняли на приборе NTEGRA PRIMA (НТ-МДТ, Зеленоград, Россия) в режиме прерывистого контакта на воздухе в контролируемых условиях (температура 25 °С, влажность воздуха 55 %). Для каждой подложки было получено не менее 25 сканов размером 2 мкм × 2 мкм с разрешением 256×256 точек.

Анализ данных АСМ (включая расчет распределений изображений АСМ молекул фермента по высоте $\rho(h)$ и числа молекул

фермента, нормированного на 400 мкм² площади подложки АСМ N₄₀₀) выполняли, как описано ранее [16].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены типичные АСМ-изображения L-ASNase, адсорбированной на слюде из растворов, выдержанных при температурах 25 °С, 30 °С, 45 °С и 55 °С, и типичные кривые распределений $\rho(h)$, полученные

для образцов фермента, обработанных при 25 °С, 30 °С, 45 °С или 55 °С. При 60 °С адсорбция фермента не наблюдалась.

Представленные АСМ-изображения иллюстрируют, что в диапазоне температур от 25 до 45 °С фермент адсорбировался на слюде в форме отдельных глобул, тогда как нагревание раствора фермента до 55 °С приводило к его адсорбции в форме нитевидных структур. Последний факт указывает на значительную денатурацию фермента при 55 °С.

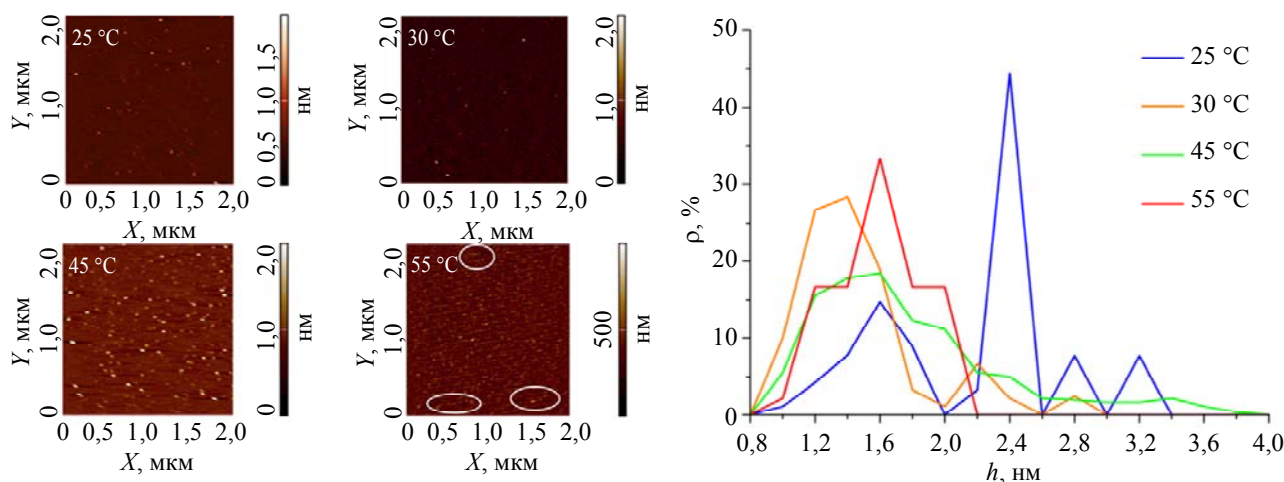


Рис. 1. Типичные АСМ-изображения и кривые распределений $\rho(h)$ L-ASNase, адсорбированной на слюде из растворов, выдержанных при 25 °С, 30 °С, 45 °С или 55 °С. Эллипсами выделены изображения денатурированных структур фермента. Размер АСМ-изображений 2 мкм × 2 мкм. Экспериментальные условия: концентрация раствора фермента 0,1 мкмоль/л, pH 7,4

На рис. 1 синяя кривая показывает, что максимум распределения $\rho(h)$ для образца L-ASNase, адсорбированной на слюде при 25 °С, соответствует значению высоты $h_{\max} = 2,4$ нм. В предыдущих исследованиях другого фермента – пероксидазы хрена (ПХ), молекулярная масса которой (44 кДа [17]) сопоставима с молекулярной массой L-ASNase (36 кДа [18]), было показано, что максимальная высота АСМ-изображений мономерной формы ПХ на слюде составляет 1,0–1,2 нм [10, 11]; высота же АСМ-изображений агрегатов ПХ высоких порядков на слюде составляет $\geq 2,4$ нм [11]. Исходя из этих соображений, мы заключаем, что после обработки при 25 °С L-ASNase адсорбируется на слюде в виде агрегатов с высотой АСМ-изображений около 2,4 нм.

При выдержке L-ASNase при более высоких температурах (от 30 до 45 °С) наблю-

дается уменьшение h_{\max} до значений 1,6 и 1,4 нм (рис. 1, оранжевая и зеленая кривые). Этот факт указывает на дезагрегацию L-ASNase с увеличением относительного содержания мономерной формы фермента в общем числе частиц, адсорбированных на слюде.

АСМ-изображения отдельных молекул L-ASNase достаточно хорошо различимы при всех исследованных значениях температуры вплоть до 45 °С, но при более высокой температуре (55 °С) компактные объекты практически не наблюдаются (рис. 1). Отсутствие компактных объектов на АСМ-изображениях, полученных в экспериментах с ферментом, выдержанным при 55 °С, указывает на то, что молекулы фермента претерпевают значительные структурные изменения при этой высокой температуре. Эти изменения приводят к образованию вытянутых структур на слюде (рис. 1), при этом адсорбция фермента в его

«обычной» форме не наблюдается. В экспериментах, проведенных при 55 °С, визуализируются только нитевидные структуры денатурированного фермента. Высота АСМ-изображений этих структур составляет от 0,5 до 0,8 нм. Дальнейшее повышение температуры до 60 °С приводит к полному исчезновению адсорбции фермента на слюде: после обработки фермента при такой высокой температуре не наблюдаются ни компактные объекты, ни нитевидные структуры. Отметим, что число частиц фермента N_{400} , адсорбированных на слюде при температурах 25, 30, 45 и 55 °С, составляло 1003, 540, 1605 и 159 частиц/400 мкм², соответственно.

Таким образом, исследование температурной денатурации L-ASNase методом АСМ показало, что при 25 °С фермент адсорбируется на слюде в агрегированной форме. Повышение температуры до 30 °С привело к двукратному уменьшению числа N_{400} адсорбированных на слюде частиц фермента. Последний факт указывает на температурно-индуцированные изменения конформации глобул фермента, которые привели к снижению адсорбции фермента. На основании значений N_{400} и кривых $\rho(h)$ (рис. 1) можно сделать вывод, что повышение температуры способствует дезагрегации фермента и адсорбции большего числа частиц фермента в мономерной форме. Эти явления, вероятно, связаны с процессами температурной денатурации фермента. Дальнейшее повышение температуры до 45 °С способствует адсорбции фермента, указывая на продолжение процессов денатурации, которые приводят к изменениям конформации глобул фермента. Последний факт способствует более прочному связыванию фермента с поверхностью слюды. Еще раз подчеркнем, что максимальная адсорбция L-ASNase на слюде наблюдается при 45 °С. Однако дальнейшее повышение температуры до 55 °С приводит к резкому снижению адсорбции фермента, сопровождающемуся появлением нитевидных структур денатурированного фермента. При 60 °С фермент полностью теряет свою адсорбционную способность, поскольку на слюде не наблюдаются ни компактных объектов, ни нитевидных структур.

Полученные нами результаты исключительно важны для разработки ЭДТНП. В пи-

лотных экспериментах с L-ASNase на ЭДТНП (устройство которого описано ранее [7]) получена зависимость ионного тока (I), протекающего через нанопору, от времени (t) при 25 °С (рис. 2).

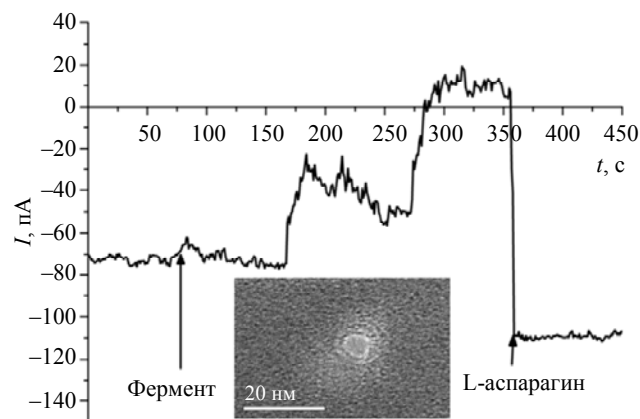


Рис. 2. Типичная зависимость $I(t)$, полученная при помощи ЭДТНП со встроенной в твердотельную нанопору макромолекулой L-ASNase и изображение 6 нм нанопоры, сформированной в неорганической мембране, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии (на вставке)

Перед добавлением фермента регистрировали базовый уровень I в 1 ммоль/л ФСБ-Д (рН 7,6). После добавления в цис-камеру измерительной ячейки ЭДТНП 0,1 мкмоль/л L-ASNase абсолютное значение I уменьшалось, указывая на частичную блокировку нанопоры молекулой фермента. Последующее добавление 10 мкмоль/л раствора L-аспарагина, в свою очередь, приводило к значительному увеличению I , указывая на разблокировку нанопоры. В холостых опытах, проведенных с использованием чистого буфера вместо раствора фермента, существенных изменений I не наблюдалось. Учитывая существенные изменения адсорбционных свойств L-ASNase в условиях температурного воздействия, для детального изучения кинетики функционирования единичных молекул этого фермента с помощью ЭДТНП необходимы дальнейшие исследования.

Заключение

Методом АСМ исследована зависимость адсорбционных свойств L-ASNase при тепловом воздействии на раствор фермента. Обнаружено, что высота АСМ-изображений адсор-

бириванной на слюде L-ASNase уменьшается с 2,4 нм при 25 °С до значений 1,6 и 1,4 нм в диапазоне температур от 35 до 45 °С. При этом число адсорбированных на слюде частиц фермента значительно увеличивается, достигая максимума при 45 °С. Этот факт указывает на то, что изменения в структуре глобулы фермента, вызванные термической денатурацией в этом диапазоне температур, способствуют его адсорбции на слюду. Дальнейшее же повышение температуры до 55 °С приводит к резкому снижению адсорбционной способности фермента, сопровождающемуся образованием нитевидных структур на поверхности слюды. При 60 °С фермент полностью утрачивает способность адсорбироваться на слюду. Полученные результаты принципиально важны для разработки электрических молекулярных детекторов на базе твердотельных нанопор, необходимых для углубленного изучения и понимания механизма и кинетики ферментативного катализа, а также могут быть полезны при разработке противораковых препаратов.

Работа выполнена в рамках темы

«Влияние соединений, обладающих геронпротективными свойствами, на единичные биомолекулы, модельные объекты и организм человека» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-643).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Batool T., Makky E. A., Jalal M., Yusoff M. M. / Appl. Biochem. Biotechnol. 2016. Vol. 178. P. 900–923.
2. Aguayo A., Cortes J., Thomas D., Pierce S., Keating M., Kantarjian H. / Cancer. 1999. Vol. 86. № 7. P. 1203–1209.
3. Jia R., Wan X., Geng X., Xue D., Xie Z., Chen C. / Microorganisms. 2021. Vol. 9. P. 1659.
4. Dobryakova N., Zhdanov D., Dumina M. et al. / Catalysts. 2023. Vol. 13. № 5. P. 832.
5. Upadhyay A. K., Singh A., Mukherjee K. J., Panda A. K. / Front. Microbiol. 2014. Vol. 5. P. 486.
6. Xie X. S., Lu H. P. / J. Biol. Chem. 1999. Vol. 274. № 23. P. 15967–15970.
7. Ivanov Y. D., Vinogradova A. V., Nevedrova E. D. et al. / Int. J. Mol. Sci. 2024. Vol. 25. P. 10864.
8. Galenkamp N. S., van den Noort M., Maglia G. / RSC Chem. Biol. 2025. Vol. 6. P. 1686.
9. Dekker C. / Nature Nanotech. 2007. Vol. 2. P. 209–215.
10. Ivanov Y. D., Pleshakova T. O., Shumov I. D. et al. / Sci. Rep. 2020. Vol. 10. P. 9022.
11. Ivanov Y. D., Shumov I. D., Kozlov A. F. et al. / Micromachines. 2023. Vol. 14. P. 1024.
12. Shinohara K., Makida Y. / Sci. Rep. 2018. Vol. 8. P. 13982.
13. Antoniou M., Tsounidi D., Petrou P. S., Beltsios K. G., Kakabakos S. E. / Med. Devices Sens. 2020. Vol. 3. P. e10072.
14. Papageorgiou A. C., Posypanova G. A., Anderson C. S., Sokolov N. S., Krasotkina J. / FEBS J. 2008. Vol. 275. № 17. P. 4306–4316.
15. Kiselyova O. I., Yaminsky I. V., Ivanov Yu. D., Kanaeva I. P., Kuznetsov V. Y., Archakov A. I. / Arch. Biochem. Biophys. 1999. Vol. 371. № 1. P. 1–7.
16. Pleshakova T. O., Kaysheva A. L., Shumov I. D. et al. / Micromachines. 2019. Vol. 10. P. 129.
17. Welinder K. G. / Eur. J. Biochem. 1979. Vol. 96. P. 483–502.
18. Michalska K., Jaskolski M. / Acta Biochim. Pol. 2006. Vol. 53. № 4. P. 627–640.

PACS: 87.15.R-

Study of changes in the adsorption properties of L-asparaginase on mica under thermal action for the development of a nanopore-based detector

E. E. Vazhenkova¹, I. D. Shumov^{1*}, D. D. Zhdanov¹, V. V. Shumyantseva¹, V. S. Ziborov², A. N. Ableev¹, O. N. Afonin¹, N. V. Vaulin³, D. V. Lebedev³, A. S. Bukatin³, I. S. Mukhin³, V. Y. Tatur⁴, A. A. Lukyanitsa^{4,5}, E. A. Ponomarenko¹, A. I. Archakov¹, and Yu. D. Ivanov¹

¹ Institute of Biomedical Chemistry, Moscow, 119121 Russia

* E-mail: shum230988@yandex.ru

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, 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 Foundation of Perspective Technologies and Novations, Moscow, 125315 Russia

⁵ Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

Received 10.03.2026; revised 24.03.2026; accepted 5.06.2026

Atomic force microscopy (AFM) is used to study the adsorption of L-asparaginase (L-ASNase) E. carotovora enzyme on mica within 25 °C to 60 °C temperature range. Thermally induced changes in the oligomeric state of L-ASNase and its adsorbability on mica are revealed. Maximum adsorption of L-ASNase in the form of individual globules is observed at 45 °C. At 55 °C, the enzyme adsorbs in the form of filamentary structures, and at 60 °C it loses its adsorbability. The results obtained are fundamentally important for the development of electrical molecular detectors based on solid-state nanopores (EDTNPs) intended for studies of the mechanism and kinetics of enzymatic catalysis, and may also be of interest for the development of anti-cancer drugs.

Keywords: L-asparaginase, atomic force microscopy, enzyme adsorption, thermal denaturation, solid-state nanopore.

REFERENCES

1. Batool T., Makky E.A., Jalal M., Yusoff M.M. Appl Biochem Biotechnol. **178**, 900–923 (2016).
2. Aguayo A., Cortes J., Thomas D., Pierce S., Keating M., Kantarjian H. Cancer **86** (7), 1203–1209 (1999).
3. Jia R., Wan X., Geng X., Xue D., Xie Z., Chen C. Microorganisms **9**, 1659 (2021).
4. Dobryakova N., Zhdanov D., Dumina M. et al. Catalysts **13** (5), 832 (2023).
5. Upadhyay A.K., Singh A., Mukherjee K.J., Panda A.K. Front. Microbiol. **5**, 486 (2014).
6. Xie X.S., Lu H.P. J. Biol. Chem. **274** (23), 15967–15970 (1999).
7. Ivanov Y.D., Pleshakova T.O., Shumov I.D. et al. Sci Rep. **10**, 9022 (2020).
8. Galenkamp N.S., van den Noort M., Maglia G. RSC Chem. Biol. **6**, 1686 (2025).
9. Dekker C. Nature Nanotech. **2**, 209–215 (2007).
10. Ivanov Y.D., Vinogradova A.V., Nevedrova E.D. et al. Int J Mol Sci. **25**, 10864 (2024).
11. Ivanov Y.D., Shumov, I.D., Kozlov A.F. et al. Micromachines **14**, 1024 (2023).
12. Shinohara K., Makida Y. Sci. Rep. **8**, 13982 (2018).
13. Antoniou M., Tsounidi D., Petrou P.S., Beltsios K.G., Kakabakos S.E. Med. Devices Sens. **3**, e10072 (2020).
14. Papageorgiou A.C., Posypanova G.A., Andersson C.S., Sokolov N.S., Krasotkina J. FEBS J. **275** (17), 4306–4316 (2008).
15. Kiselyova O.I., Yaminsky I.V., Ivanov Yu.D., Kanaeva I.P., Kuznetsov, V.Y., Archakov A.I. Arch Biochem Biophys. **371** (1), 1–7 (1999).
16. Pleshakova T.O., Kaysheva A.L., Shumov I.D. et al. Micromachines **10**, 129 (2019).
17. Welinder K.G. Eur J Biochem. **96**, 483–502 (1979).
18. Michalska K., Jaskolski M. Acta Biochim Pol. **53** (4), 627–640 (2006).

Об авторах

Важенкова Екатерина Евгеньевна, 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: katyajustflash@gmail.com SPIN-код: 5558-6468, AuthorID: 1262654, ORCID: 0009-0001-4224-8907.

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.

Жданов Дмитрий Дмитриевич, д.б.н., заведующий 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). E-mail: zhdanovdd@gmail.com SPIN-код: 3845-2544, AuthorID: 971666, ORCID: 0000-0003-4753-7588.

Шумянцева Виктория Васильевна, д.б.н., профессор, заведующая 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). E-mail: viktorija.shumyantseva@ibmc.msk.ru SPIN-код: 1104-2003, AuthorID: 46223, ORCID: 0000-0002-1509-7218.

Зиборов Вадим Серафимович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (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.

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., доцент, 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: 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.

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.

Татур Вадим Юрьевич, исполнительный директор, Фонд перспективных технологий и новаций (125315, Россия, Москва, 2-й Амбулаторный пр-д, д. 8, стр. 1). E-mail: v_tatur@mail.ru SPIN-код: 5383-2035, AuthorID: 1292871, ORCID: 0000-0002-6415-5189.

Лукьяница Андрей Александрович, д.т.н., ведущий научный сотрудник, Фонд перспективных технологий и новаций (125315, Россия, Москва, 2-й Амбулаторный пр-д, д. 8, стр. 1); Факультет вычислительной математики и кибернетики, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, ул. ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 52). E-mail: andrei_luk@mail.ru SPIN-код: 6172-6061, AuthorID: 4162, ORCID: 0000-0002-0517-0602.

Пономаренко Елена Александровна, чл.-корр. РАН, д.б.н., директор, 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: 2463731@gmail.com SPIN-код: 8427-5490, AuthorID: 180406, ORCID: 0000-0001-8527-6003.

Арчаков Александр Иванович, Академик РАН, д.б.н., 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, заведующий 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). E-mail: yurii.ivanov.nata@gmail.com SPIN-код: 7935-0461, AuthorID: 78445, ORCID: 0000-0001-5041-1914.