



Получено: 31.05.2024 г. | Принято: 7.06.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.260.266>

Научная статья

УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ИНАКТИВАЦИИ ФЕРМЕНТА ПЕРОКСИДАЗЫ ХРЕНА

Ю.Д.Иванов^{1, 2}, д.б.н., зав. лаб., проф., ORCID: 0000-0001-5041-1914

И.Д.Шумов¹, к.б.н., науч. сотр., ORCID: 0000-0002-9795-7065

А.Н.Аблеев¹, вед. инж., ORCID: 0009-0004-3096-107X

А.Ф.Козлов¹, вед. инж., ORCID: 0000-0002-2117-8743

Е.Е.Важенкова¹, лаборант, ORCID: 0009-0001-4224-8907

В.С.Зиборов^{1, 2}, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., ORCID: 0000-0001-7942-3337

А.Ю.Долгобородов², д.ф.-м.н., зав. лаб., ORCID: 0000-0001-7054-7341

О.Ф.Петров², д.ф.-м.н., дир., акад. РАН, ORCID: 0000-0002-6373-0305

С.В.Будник³, ген. дир., ORCID: 0009-0006-7597-8523

Р.С.Чурюкин³, к.б.н., гл. техн., ORCID: 0000-0002-2845-1052

С.В.Новиков⁴, к.т.н., зам. ген. дир., ORCID: 0000-0002-0943-9488

А.М.Тереза⁵, ст. науч. сотр., к.ф.-м.н., ORCID: 0009-0005-7985-0044

А.И.Арчаков¹, д.б.н., проф., акад. РАН, науч. рук., ORCID: 0000-0002-2290-8090 / shum230988@yandex.ru

Аннотация. Нанотехнологии – это технологии, которые манипулируют с объектами, имеющими характеристические размеры менее 100 нм. В работе в качестве объектов были использованы молекулы фермента пероксидазы хрена (ПХ), имеющие размеры порядка 5 нм, а устройство для их инактивации представляло из себя ускоритель электронов, позволяющий получить пучок электронов с энергией 9,7 МэВ. Было показано, что при дозе облучения 25 кГр активность этого фермента снижалась практически до нуля. Полученные результаты необходимо учитывать в разработке методов стерилизации продуктов питания и упаковочных материалов для пищевой и медицинской продукции.

Ключевые слова: пероксидаза хрена, электронный ускоритель, инактивация фермента

Для цитирования: Ю.Д. Иванов, И.Д. Шумов, А.Н. Аблеев, А.Ф. Козлов, Е.Е. Важенкова, В.С. Зиборов, А.Ю. Долгобородов, О.Ф. Петров, С.В. Будник, Р.С. Чурюкин, С.В. Новиков, А.М. Тереза, А.И. Арчаков. Ускоритель электронов для инактивации фермента пероксидазы хрена. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 5. С. 260–266. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.260.266>.

Received: 31.05.2024 | Accepted: 7.06.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.260.266>

Original paper

ELECTRON ACCELERATOR FOR INACTIVATION OF HORSE RADISH PEROXIDASE ENZYME

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В.Н. Ореховича" (ИБМХ), Москва, Россия / Institute of Biomedical Chemistry, Moscow, Russia

² ФГБУН "Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)", Москва, Россия / Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ ООО "Теокоортекс", г. Обнинск, Россия / Teocortex LLC, Obninsk, Russia

⁴ АО "РИЦ "ТЕХНОСФЕРА" Москва, Россия / Associate Printing-and-Publication Centre Technosphaera, Moscow, Russia

⁵ ФГБУН "Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН)", Москва, Россия / N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences (FRCCP RAS), Moscow, Russia



Yu.D.Ivanov^{1,2}, Doct. of Sci. (Biology), Prof., Head of Laboratory, ORCID: 0000-0001-5041-1914

I.D.Shumov¹, Cand. of Sci. (Biology), Researcher, ORCID: 0000-0002-9795-7065

A.N.Ableev¹, Leading Engineer, ORCID: 0009-0004-3096-107X

A.F.Kozlov¹, Leading Engineer, ORCID: 0000-0002-2117-8743

E.E.Vazhenkova¹, Laboratory assistant, ORCID: 0009-0001-4224-8907

V.S.Ziborov^{1,2}, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, ORCID: 0000-0001-7942-3337

A.Yu.Dolgoborodov², Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, ORCID: 0000-0001-7054-7341

O.F.Petrov², Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Acad. of RAS, Director, ORCID: 0000-0002-6373-0305

S.V.Budnik³, Director General, ORCID: 0009-0006-7597-8523

R.S.Churyukin³, Cand. of Sci. (Biology), Chief technologist, ORCID: 0000-0002-2845-1052

S.V.Novikov⁴, Cand. of Sci. (Tech), Deputy General Director, ORCID: 0000-0002-0943-9488

A.M.Tereza⁵, Senior Scientist, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics) ORCID: 0009-0005-7985-0044

A.I.Archakov¹, Doct. of Sci. (Biology), Prof., Academician of RAS, Scientific Adviser, ORCID: 0000-0002-2290-8090 / shum230988@yandex.ru

Abstract. Nanotechnology manipulates objects with characteristic dimensions of less than 100 nm. In this work, molecules of horseradish peroxidase (HRP) enzyme with dimensions of the order of 5 nm are used as objects, and the device for their inactivation is an electron accelerator, which allows us to obtain electron beam with energy of 9.7 MeV. We demonstrate that upon an irradiation dose of 25 kGy, the activity of the enzyme decreased virtually to zero. The results obtained must be taken into account in the development of methods for sterilization of food and packaging materials for food and medical products.

Keywords: horseradish peroxidase, electron accelerator, enzyme inactivation

For citation: Yu.D. Ivanov, I.D. Shumov, A.N. Ableev, A.F. Kozlov, E.E. Vazhenkova, V.S. Ziborov, A.Yu. Dolgoborodov, O.F. Petrov, S.V. Budnik, R.S. Churyukin, S.V. Novikov, A.M. Tereza, A.I. Archakov. Electron accelerator for inactivation of horseradish peroxidase enzyme. NANOINDUSTRY. 2024. Vol. 17. No. 5. PP. 260–266. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.260.266>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важной задачей исследований, ориентированных на развитие пищевых технологий, биотехнологии и биомедицины, является разработка методов инактивации патогенных микроорганизмов (таких как бактерии [1] и вирусные частицы [2, 3]) в продуктах питания [2–6], а также стерилизации медицинских устройств и материалов [7]. Опубликованные исследования показали перспективность использования для вышеуказанных целей облучения обрабатываемых сред (включая упаковочные материалы) ускоренными электронами [5, 6]. Разработанные к настоящему времени устройства для обработки материалов ускоренными электронами позволяют достигать энергии электронов порядка 1–10 МэВ. В частности, устройство TT1000 (Бельгия) позволяет получать электронные пучки с энергией электронов на уровне 7 МэВ [8], а устройство отечественного производства TEOCORTEX (Россия) – даже 10 МэВ [9]. Такие устройства вполне могут использоваться для обработки поверхностей с целью их стерилизации [10]. Эти установки удобнее в использовании,

INTRODUCTION

Nowadays, an important task of research aimed at the food technology development, biotechnology and biomedicine is the development of methods for inactivation of pathogenic microorganisms (such as bacteria [1] and viral particles [2, 3]) in food [2–6] and sterilisation of medical devices and materials [7]. Published studies have shown the promising use of irradiation of treated media (including packaging materials) with accelerated electrons for the above purposes [5, 6]. The devices developed to date for processing materials with accelerated electrons allow achieving electron energies of the order of 1–10 MeV. In particular, the device TT1000 (Belgium) allows to obtain electron beams with electron energy at the level of 7 MeV [8], and the device of domestic production TEOCORTEX (Russia) – even 10 MeV [9]. Such devices may be used for surface treatment for sterilisation [10]. These units are more convenient to use than chemical sterilisation units, as the electron accelerator-based units are much easier to operate. At the same time, further detailed study of the effect of radiation doses on the treated materials and microorganisms to be inactivated is necessary. In connection with the latter circumstance,



чем установки химической стерилизации, так как установки на базе электронных ускорителей гораздо проще в управлении. В то же время, необходимо дальнейшее детальное изучение влияния доз излучения на обрабатываемые материалы и микроорганизмы, подлежащие инактивации. В связи с последним обстоятельством, необходимо отметить, что процессы в живых системах, включая патогенные микроорганизмы, регулируются ферментными системами [11]. Соответственно, важным направлением исследований является изучение влияния воздействия пучков ускоренных электронов на функционирование ферментных систем.

В нашей работе было проведено исследование инактивации модельного фермента – пероксидазы хрена в результате облучения его раствора пучком ускоренных электронов с высокой энергией (~10 МэВ). Фермент ПХ был выбран в качестве модельного объекта исходя из его изученности [12]: так, охарактеризованы его химический состав [13] и пространственная структура [14]. Этот фермент представляет из себя гликопротеин с молекулярной массой 40–44 кДа [13, 15].

В качестве метода определения инактивации ПХ в результате воздействия пучка ускоренных электронов на раствор фермента использовали спектрофотометрию, которая позволяет проводить анализ активности фермента после воздействия на него различными физико-химическими методами [16–18].

Было показано, что доза облучения 25 кГр приводит к практически полной потере ферментом активности в реакции окисления его субстрата – 2,2'-азино-бис(3-этилбензотиазолин-6-сульфоната) (АБТС) – в присутствии пероксида водорода (H_2O_2).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использованные реактивы. Аналогично работе [18], в настоящей работе использовали белок ПХ, выделенный из хрена (Sigma, Cat. #6782). 2,2'-азино-бис(3-этилбензотиазолин-6-сульфонат) (АБТС) был также приобретен в Sigma (Cat. #A-1888). Пероксид водорода (H_2O_2 , ч.д.а.), лимонная кислота (ос.ч.) и однозамещенный фосфат натрия (Na_2HPO_4 , ч.д.а.) были приобретены в "Реахим" (Москва). 2 мМ фосфатно-солевой буфер в модификации Дульбекко (ФСБ-Д) готовили путем растворения готовой смеси солей (Pierce, США) в ультрачистой деионизированной воде. Все растворы, использованные в экспериментах, готовили, используя ультрачистую воду (18,2 МОм·см), очищенную с помощью установки Simplicity UV (Millipore, Франция).

Эксперименты на электронном ускорителе. Для исследования воздействия электронного пучка на фермент ПХ 1 мл 10^{-7} М раствора фермента в 2 мМ ФСБ-Д с pH 7.4 помещали в одноразовую

it should be noted that processes in living systems, including pathogenic microorganisms, are regulated by enzyme systems [11]. Accordingly, an important area of research is the study of influence of the accelerated electron beams impact on the functioning of enzyme systems.

In our work, we studied inactivation of a model enzyme, horseradish peroxidase, as a result of irradiation of its solution with a beam of accelerated electrons with high energy (~10 MeV). The enzyme HP was chosen as a model object on the basis of its studied [12]: thus, its chemical composition [13] and spatial structure [14] have been characterised. This enzyme is a glycoprotein with a molecular mass of 40–44 kDa [13, 15].

Spectrophotometry was used as a method to determine HP inactivation as a result of exposure of the enzyme solution to an accelerated electron beam, which allows the analysis of enzyme activity after exposure to various physicochemical methods [16–18].

It was shown that an irradiation dose of 25 kGy resulted in an almost complete loss of enzyme activity in the oxidation reaction of its substrate, 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate) (ABTS), in the presence of hydrogen peroxide (H_2O_2).

RESEARCH METHODS

Reagents used. Similar to [18], the present work used a HP protein isolated from horseradish (Sigma, Cat. #6782). 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate) (ABTS) was also purchased from Sigma (Cat. #A-1888). Hydrogen peroxide (H_2O_2 , h.p.a.), citric acid (o.p.h.) and single-substituted sodium phosphate (Na_2HPO_4 , h.p.a.) were purchased from Reachim (Moscow). 2 mM phosphate-salt buffer in Dulbecco's modification (PSB-D) was prepared by dissolving a ready-made salt mixture (Pierce, USA) in ultrapure deionised water. All solutions used in the experiments were prepared using ultrapure water (18.2 mOsm · cm) purified using a Simplicity UV unit (Millipore, France).

Electron accelerator experiments. To study the effect of electron beam on the enzyme PC, 1 ml of 10^{-7} M enzyme solution in 2 mM FSB-D with pH 7.4 was placed in a disposable polypropylene tube with protein solution with a nominal volume of 1.7 ml. The tube was placed in the electron beam zone of the electron accelerator manufactured by "Theocortex". The temperature of the medium was maintained at $T_{\text{среды}} = 20^\circ\text{C}$. The radiation dose absorbed by the HP sample irradiated in the electron accelerator was 25 kGy.

Control experiments. Control experiments were performed with a sample of HP kept in an isolated room. A 1 mL control sample of 10^{-7} M enzyme solution in 2 mM FBS-D buffer with pH 7.4 was also placed in a disposable polypropylene tube containing protein solution with a nominal volume of 1.7 mL, which was placed in



полипропиленовую пробирку с раствором белка номинальным объемом 1,7 мл. Пробирку размещали в зоне воздействия электронного пучка ускорителя электронов ООО "Теокортес". При этом температура среды поддерживали на уровне $T_{\text{среды}} = 20^\circ\text{C}$. Поглощенная образцом ПХ, облученным в ускорителе электронов, доза излучения составила 25 кГр. Облученный образец ПХ передавали на спектрофотометрический анализ.

Контрольные эксперименты. Контрольные эксперименты выполняли с образцом ПХ, выдержанном в изолированном помещении. Контрольный образец 10^{-7} М раствора фермента в 2 мМ ФСБ-Д буфере с pH 7,4 объемом 1 мл также помещали в одноразовую полипропиленовую пробирку с раствором белка номинальным объемом 1,7 мл, которую размещали в изолированном помещении с уровнем фонового излучения, разрешенного общепринятыми санитарными нормами. После этого контрольный образец раствора фермента также передавали на спектрофотометрический анализ.

Спектрофотометрические измерения. Спектрофотометрическое определение активности фермента ПХ проводили согласно методике Sanders et al. [19], как описано в наших предыдущих публикациях [16–18]. А именно, при помощи спектрофотометра модели 8453 (Agilent Deutschland GmbH, Вальдбронн, Германия) регистрировали зависимость поглощения 10^{-9} М раствора ПХ от времени при длине волны 405 нм в течение 5 мин. Измерения проводили в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1 см (Agilent Deutschland GmbH, Вальдбронн, Германия). Измерения проводили в фосфатно-цитратном буфере, содержащем 51 мМ Na_2HPO_4 , 24 мМ лимонной кислоты, pH 5 [19], в который также был предварительно добавлен субстрат АБТС в концентрации 0,3 мМ. Для проведения измерений 30 мкл 0,1 мМ (10^{-7} М) исследуемого раствора ПХ добавляли в кварцевую кювету, содержащую 2,95 мл вышеописанного буфера, содержащего субстрат АБТС, и тщательно перемешивали. Затем в кювету добавляли 8 мкл 3% (масс./масс.) раствора пероксида водорода и сразу же начинали регистрацию зависимости поглощения раствора в кювете при длине волны 405 нм от времени.

Ферментативную активность ПХ в реакции окисления субстрата АБТС рассчитывали по данным спектрофотометрических измерений согласно методике фирмы-производителя фермента и субстрата (Sigma) [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты проводили в два этапа. На первом этапе проводили облучение раствора фермента ПХ в электронном ускорителе. Доза поглощенного

ан изоляции комнаты с уровнем фоновой радиации, разрешенной общепринятыми санитарными нормами. После этого, контрольный образец раствора фермента также передавали на спектрофотометрический анализ.

Spectrophotometric measurements. Spectrophotometric determination of HP enzyme activity was performed according to the method of Sanders et al. [19] as described in our previous publications [16–18]. Specifically, the time-dependent absorbance of 10^{-9} M solution of HP was recorded at a wavelength of 405 nm for 5 min using a spectrophotometer model 8453 (Agilent Deutschland GmbH, Waldbronn, Germany). The measurements were carried out in quartz cuvettes with an optical path length of 1 cm (Agilent Deutschland GmbH, Waldbronn, Germany). Measurements were performed in phosphate-citrate buffer containing 51 mM Na_2HPO_4 , 24 mM citric acid, pH 5 [19], to which ABTS substrate was also previously added at a concentration of 0.3 mM. For measurements, 30 μl of 0.1 μM (10^{-7} M) of the tested HP solution was added to a quartz cuvette containing 2.95 ml of the above buffer containing the ABTS substrate and mixed thoroughly. Then 8 μl of 3% (wt./mass) hydrogen peroxide solution was added to the cuvette, and the time dependence of the absorbance of the solution in the cuvette at 405 nm was immediately recorded.

The enzymatic activity of HP in reaction of substrate oxidation by ABTS was calculated from spectrophotometric measurements according to the method of the enzyme and substrate manufacturer (Sigma) [20].

RESULTS AND DISCUSSION

The experiments were carried out in two stages. At the first stage, irradiation of the solution of enzyme HP in the electron accelerator was carried out. The dose of radiation absorbed by this solution was 25 kGy. The control sample of the enzyme solution was kept in an isolated room, excluding its irradiation. At the second stage, enzyme activity was determined in irradiated and control samples of the enzyme solution by spectrophotometry based on the dependence of the product production rate during the reaction of substrate oxidation by ABTS catalysed by HP. For this purpose, the product yield of the reaction was monitored from time for 5 min. During this enzymatic reaction, absorbance of the solution containing the reaction product produced during 5 min at a wavelength of 405 nm and an optical path length of 1 cm was $A_{\text{контр}} = 2.0$ and $A_{\text{облуч}} = 0.06$ for the control and 25 kGy irradiated enzyme samples, respectively. Accordingly, the activity of the enzyme HP relative to its substrate ABTS in the control and irradiated samples was 111.67 units/ml and 3.35 units/ml, having decreased as a result of irradiation by 33 times.

The data obtained by us are in agreement with those obtained earlier by Liu et al. [21]. These authors studied



этим раствором излучения составила 25 кГр. Контрольный образец раствора фермента выдерживали при это в изолированном помещении, исключая его облучение. На втором этапе определяли активность фермента в облученном и в контрольном образцах раствора фермента методом спектрофотометрии исходя из зависимости скорости наработки продукта в ходе реакции окисления субстрата АБТС, катализируемой ПХ. С этой целью проводили мониторинг наработки продукта реакции от времени в течение 5 мин. В процессе этой ферментативной реакции поглощение раствора, содержащего наработанный в течение 5 мин продукт реакции, при длине волны 405 нм и длине оптического пути 1 см составило $A_{\text{контр}} = 2,0$ и $A_{\text{облуч}} = 0,06$ в случае контрольного и облученного дозой 25 кГр образцов фермента, соответственно. Соответственно, активность фермента ПХ по отношению к его субстрату АБТС в контрольном и облученном образцах составила 111,67 ед./мл и 3,35 ед./мл, уменьшившись в результате облучения в 33 раза.

Полученные нами данные согласуются с данными, полученными ранее Liu et al. [21]. Эти авторы исследовали воздействие облучения электронным пучком на активность ферментов цианобактерий *Microcystis aeruginosa*, обнаружили ~10-кратное снижение активности пероксидазы *Microcystis aeruginosa* после облучения электронным пучком с энергией лишь 1 МэВ при дозах облучения даже 5 кГр. В нашем же случае, энергия пучка была в 10 раз выше, а доза облучения – в 5 раз выше, чем в экспериментах Liu et al. [21], что приводило к еще более сильной дезактивации фермента пероксидазы. В нашей работе были проведены исследования по влиянию облучения электронным пучком с энергией ~10 МэВ на фермент ПХ. Для этого использовался спектрофотометрический метод контроля активности фермента ПХ. Исходя из спектрофотометрических данных получено, что активность фермента без воздействия облучения была в 33 раза выше, чем после воздействия облучения дозой 25 кГр. Известно, что активность фермента связана с его пространственной структурой, включая структуру его активного центра [11]. Соответственно, представленные данные означают, что при дозе облучения порядка 25 кГр наблюдается разрушение структуры фермента, включая его активный центр.

ВЫВОДЫ

Было проведено исследование влияния ускоренных электронов с энергией ~10 МэВ на фермент ПХ. Было получено, что при такой дозе облучения наблюдается практически полная инактивация фермента, что указывает на разрушение его структуры. Полученные результаты важны для корректной оценки влияния

the effect of electron beam irradiation on the activity of enzymes of cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* and found a ~10-fold decrease in the activity of *Microcystis aeruginosa* peroxidase after irradiation with an electron beam energy of only 1 MeV at irradiation doses of even 5 kGy. In our case, the beam energy was 10 times higher and the irradiation dose was 5 times higher than in the experiments reported by Liu et al. [21], which led to even stronger deactivation of the peroxidase enzyme. In our work, we carried out studies on the effect of irradiation with an electron beam of ~10 MeV energy on the enzyme HP. The spectrophotometric method was used to control the activity of the enzyme HP. Based on spectrophotometric data it was obtained that the enzyme activity without irradiation was 33 times higher than after irradiation with a dose of 25 kGy. It is known that enzyme activity is related to its spatial structure, including the structure of its active site [11]. Accordingly, the presented data mean that at an irradiation dose of about 25 kGy, destruction of the enzyme structure, including its active centre, is observed.

CONCLUSIONS

The effect of accelerated electrons with an energy of ~10 MeV on the HP enzyme was studied. It was obtained that at such an irradiation dose almost complete inactivation of the enzyme was observed, indicating the destruction of its structure. The results are important for correct assessment of accelerated electrons influence on enzymes during sterilisation of foodstuffs and other materials in installations based on electron accelerators. Also, the results of our work should be taken into account to create safe working conditions for personnel.

ACKNOWLEDGMENTS

Spectrophotometric measurements were performed within the framework of the Programme of Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for a Long-term Period (2021–2030) (№122030100168-2). The enzyme irradiation in an electron accelerator was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-00270-24-00).

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



ускоренных электронов на ферменты при стерилизации продуктов питания и других материалов в установках на базе ускорителей электронов. Также результаты нашей работы следует учитывать для создания безопасных условий работы персонала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Спектрофотометрические измерения выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) (№ 122030100168-2). Облучение фермента в электронном ускорителе выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-00270-24-00).

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Luo Z., Chang G., Liu Y., Ni K., Zhou T., Lv X., Yu J., Bai J., Wang X. Inactivation of suspended cells and biofilms of the gram-negative bacteria by electron beam irradiation and possible mechanisms of action. LWT Food Sci Technol 2022. Vol. 172. P. 114171. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114171>
2. Predmore A., Sanglay G.C., DiCaprio E., Li J., Uribe R.M., Lee K. Electron beam inactivation of Tulane virus on fresh produce, and mechanism of inactivation of human norovirus surrogates by electron beam irradiation. Int J Food Microbiol 2015. Vol. 198. PP. 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.12.024>
3. Espinosa A.C., Jesudhasan P., Arredondo R., Cepeda M., Mazari-Hiriart M., Mena K.D., Pillai S.D. Quantifying the Reduction in Potential Health Risks by Determining the Sensitivity of Poliovirus Type 1 Chat Strain and Rotavirus SA-11 to Electron Beam Irradiation of Iceberg Lettuce and Spinach. Appl Environmental Biol. 2012. Vol. 78(4). PP. 988–993. <https://doi.org/10.1128/AEM.06927-11>
4. Lung H., Cheng Y., Chang Y., Huang H., Yang B.B., Wang C. Microbial decontamination of food by electron beam irradiation. Trends Food

ЭЛЕКТРОНИКА НАНОТЕХНОЛОГИИ ФОТОНИКА ТЕРМОТЕХНИКА АНАЛИТИКА

ИНФПРОСТРАНСТВО ФЕССИОНАЛОВ

ТЕХНОСФЕРА

Мы на  YouTube

Подписывайтесь

Проектирование и аттестация чистых технологических сред:
H₂O, Ar, He, N₂, O₂, CO₂, C₃H₈ и др.

Допуск СРО № СРО-П-174-01102012
Аттестат аккредитации № AAC.A.00227

www.aseptica.biz

Tel.: (495) 585-88-15, (495) 274-01-02 E-mail: aseptic5858815@gmail.com



- Sci Technol. 2015. Vol. 44. PP. 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.03.005>
5. **Tahergorabi R., Matak K.E., Jaczynski J.** Application of electron beam to inactivate *Salmonella* in food: Recent developments. *Food Res Intl.* 2012. Vol. 45. PP. 685–694. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.003>
 6. **Grasso E.M., Uribe-Rendon R.M., Lee K.** Inactivation of *Escherichia coli* Inoculated onto Fresh-Cut Chopped Cabbage Using Electron-Beam Processing. *J Food Protection.* 2011. Vol. 74(1). PP. 115–118. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-10-281>
 7. **Gotzmann G., Portillo J., Wronski S., Kohl Y., Gorjup E., Schuck H., Rögner F.H., Müller M., Chaberny I.F., Schönfelder J., Wetzel G.** Low-energy electron-beam treatment as alternative for on-site sterilization of highly functionalized medical products A feasibility study. *Radiation Phys Chem.* 2018. Vol. 150. PP. 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.04.008>
 8. **Abs M., Jongen Y., Poncellet E., Bol J.** The IBA rhodotron TT1000: a very high power E-beam accelerator. *Radiation Phys Chem.* 2004. Vol. 71. PP. 285–288. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.03.061>
 9. **Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Abrosimov V.M., Gavrish V.M., Trofimov V.I., Budnik S.V., Churyukin R.S.** Effect of 10 MeV electron irradiation on polyimide composites for space systems, *Acta Astronautica.* 2021. Vol. 184. PP. 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.03.032>
 10. **Hutchinson F.** Chemical changes induced in DNA by ionizing radiation. *Progress in Nucleic Acid Res Mol Biol.* 1985. Vol. 32. PP. 115–154. [https://doi.org/10.1016/S0079-6603\(08\)60347-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6603(08)60347-5)
 11. **Metzler D.E.** Biochemistry, the Chemical Reactions of Living Cells, 1st ed.; Academic Press: Cambridge, UK, 1977.
 12. **Veitch N.C.** Horseradish peroxidase : a modern view of a classic enzyme. *Phytochemistry.* 2004. Vol. 65(3). PP. 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2003.10.022>
 13. **Welinder K.G.** Amino acid sequence studies of horseradish peroxidase, Amino and carboxyl termini, cyanogen bromide and tryptic fragments, the complete sequence, and some structural characteristics of horseradish peroxidase. *Cent Eur J Biochem.* 1979. Vol. 96. PP. 483–502. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1979.tb13061.x>
 14. **Gajhede M., David J. Schuller D.J., Henriksen A., Smith A.T., Poulos T.L.** Crystal structure of horseradish peroxidase C at 2.15 Å resolution / *Nature Structural Biology.* 1997. Vol. 4, PP. 1032–1038. <https://doi.org/10.1038/nsb1297-1032>
 15. **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, *J Cell Sci.* 1981. Vol. 49(1). PP. 69–86. <https://doi.org/10.1242/jcs.49.1.69>
 16. **Ivanov Y.D., Pleshakova T.O., Shumov I.D., Kozlov A.F., Ivanova I.A., Valueva A.A., Tatur V.Y., Smelov M.V., Ivanova N.D., Ziborov V.S.** AFM imaging of protein aggregation in studying the impact of knotted electromagnetic field on a peroxidase. *Sci Rep.* 2020. Vol. 10. P. 9022. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65888-z>
 17. **Ziborov V.S., Pleshakova T.O., Shumov I.D., Kozlov A.F., Valueva A.A., Ivanova I.A., Ershova M.O., Larionov D.I., Evdokimov A.N., Tatur V.Y., Aleshko A.I., Sakharov K.Y., Dolgoborodov A.Y., Fortov V.E., Archakov A.I., Ivanov Y.D.** The Impact of Fast-Rise-Time Electromagnetic Field and Pressure on the Aggregation of Peroxidase upon Its Adsorption onto Mica. *Appl Sci.* 2021. Vol. 11(24). P. 11677. <https://doi.org/10.3390/app112411677>
 18. **Иванов Ю.Д., Шумов И.Д., Козлов А.Ф., Ершова М.О., Валуева А.А., Иванова И.А., Татур В.Ю., Лукьяница А.А., Иванова Н.Д., Неведрова Е.Д., Зиборов В.С.** АСМ-исследование пост-эффекта движения глицерина в выходной части проточной системы на адсорбционные свойства белка. *НАНОИНДУСТРИЯ.* 2023. № 16(2). С. 106–113. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.2.106.113>
 19. **Sanders 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, *Eur J Biochem.* 1994. Vol. 224. PP. 1029–1037. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1994.01029.x>
 20. **Электронный источник:** Enzymatic Assay of Peroxidase (EC 1.11.1.7) 2,20-Azino-Bis(3-Ethylbenzthiazoline-6-Sulfonic Acid) as a Substrate Sigma Prod. No. P-6782. Available online: <https://www.sigmaaldrich.com/RU/en/technical-documents/protocol/protein-biology/enzyme-activity-assays/enzymatic-assay-of-peroxidase-abts-as-substrate> (дата обращения 18 February 2022).
 21. **Liu S., Zhao Y., Jiang W., Wu M., Ma F.** Inactivation of *Microcystis aeruginosa* by Electron Beam Irradiation. *Water Air Soil Pollut.* 2014. Vol. 225. P. 2093. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2093-8>



ХІ РОССИЙСКИЙ ФОРУМ БИОТЕХНОЛОГИЙ

24 - 27 СЕНТЯБРЯ 2024, наукоград КОЛЬЦОВО

БИЗНЕС- ФОРУМ

ДЛЯ БИЗНЕСА,
НАУКИ, ВЛАСТИ
И ИНФРАСТРУКТУРЫ

НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ВИРУСОЛОГИЯ,
МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ,
ФУНДУМЕНТАЛЬНАЯ МЕДИЦИНА,
БИОТЕХНОЛОГИЯ, БИОФИЗИКА,
БИОИНФОРМАТИКА

ОТРАСЛЕВАЯ ВЫСТАВКА

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
И БИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ
КОМПАНИЙ

OPENBIO.RU