



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 4. С. 472–478

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2023, vol. 23, iss. 4, pp. 472–478

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-4-472-478>, EDN: SSVFHT

Научная статья

УДК 544.47:542.943:615.322



Оценка активности пероксидаз, содержащихся в различных растительных источниках

А. А. Соловьева , О. Е. Лебедева, Т. Ч. Фам

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

Соловьева Анна Алексеевна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии, solovyeva@bsu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5066-2932>

Лебедева Ольга Евгеньевна, доктор химических наук, профессор кафедры общей химии, olebedeva@bsu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5021-028X>

Фам Тхи Чинь, магистрант 2-го года обучения Института фармации, химии и биологии, 1097993@bsu.edu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5851-3618>

Аннотация. В данной работе была проведена ферментативная реакция обесцвечивания водного раствора красителя бромфенолового синего в присутствии пероксида водорода и пероксидазы, содержащейся в корнеплодах хрена обыкновенного (*Armoracia rusticana*), редиса (*Raphanus sativus* var. *radicula*), репы желтой (*Brassica napobrassica*), дайкона (*Raphanus sativus*), редьки черной (*Raphanus sativus* 'Niger'), редьки зеленой (*Raphanus*) либо кочерыжке капусты белокочанной (*Brassica capitata*). Реакцию проводили при начальном содержании красителя 25,1 мкМ, концентрации пероксида водорода 0,4 мМ, при $t = 24^\circ\text{C}$ и pH 4,01, в качестве источника пероксидазы использовали кожуру различных овощей, вводя ее в реакцию без предварительного выделения фермента. При использовании отходов хрена, редьки черной, капусты белокочанной, репы удается достигнуть 95% степени обесцвечивания красителя в его водном растворе. Рассчитаны максимальная скорость и константы Михаэлиса ферментативной реакции методом линеаризации в координатах Лайнуивера – Берка. Показано, что функционирование ферментного комплекса, содержащегося в кожуре редьки черной, сохраняется при повышении температуры от 23 до 40°C.

Ключевые слова: пероксидаза хрена, бромфеноловый синий, биодеколоризация

Для цитирования: Соловьева А. А., Лебедева О. Е., Фам Т. Ч. Оценка активности пероксидаз, содержащихся в различных растительных источниках // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 4. С. 472–478. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-4-472-478>, EDN: SSVFHT

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Evaluation of activity of peroxidases contained in various plant sources

A. A. Solovyeva , O. E. Lebedeva, T. T. Pham

Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

Anna A. Solovyeva, solovyeva@bsu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5066-2932>

Olga E. Lebedeva, olebedeva@bsu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5021-028X>

Thi Trinh Pham, 1097993@bsu.edu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5851-3618>

Abstract. In this study, the decolorization reaction of aqueous solution bromophenol blue dye was carried out in the presence of hydrogen peroxide and peroxidase contained in the roots of horseradish (*Armoracia rusticana*), radish (*Raphanus sativus* var. *radicula*), yellow turnip (*Brassica napobrassica*), daikon (*Raphanus sativus*), black radish (*Raphanus sativus* 'Niger'), green radish (*Raphanus*) or stalk of white cabbage (*Brassica capitata*). The reaction was carried out at an initial dye content of 25,1 μM , a hydrogen peroxide concentration of 0,4 mM, at $t = 24^\circ\text{C}$ and pH 4,01, the peel of various vegetables was used as a source of peroxidase; it was inserted into the reaction without enzyme primary extraction. When using horseradish waste, black radish, white cabbage, turnips, it is possible to get the degree of decolorization of the dye in its aqueous solution by 95%. The maximum rate and Michaelis constants of the enzymatic reaction are calculated by the linearization method in the Linuiver – Burke coordinates. It is shown that the activity of peroxidase contained in the peel of black radish persists with an increase in temperature from 23 to 40°C.

Keywords: horseradish peroxidase, bromophenol blue dye, enzymatic decolorization

For citation: Solovyeva A. A., Lebedeva O. E., Pham T. T. Evaluation of activity of peroxidases contained in various plant sources. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 4, pp. 472–478 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-4-472-478>, EDN: SSVFHT

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)



Введение

Загрязнение воды красителями является одной из серьезных экологических проблем, даже в небольших количествах красители существенно снижают прозрачность природной воды. Красители обычно используются в пищевой, косметической, кожевенной, текстильной, бумажной и пластмассовой промышленности. Например, при окрашивании в процессе текстильной обработки происходит значительная потеря красителя (до 50%), который затем попадает в водные объекты в составе сточных вод. Методы обнаружения и устранения загрязнений от красителей постоянно совершенствуются [1]. Наличие недостатков у физико-химических методов разрушения красителей вызвало интерес исследователей по всему миру к разработке альтернативных экономически эффективных и экологически чистых способов обезвреживания. Так, было показано, что в присутствии пероксида водорода пероксидаза хрена окисляет широкий спектр органических субстратов. Красители, содержащиеся в сточных водах, могут быть эффективно удалены с использованием пероксидазы хрена [2–6].

В настоящее время корни хрена обыкновенного (*Armoracia rusticana*) служат основным источником пероксидазы. В работах [7, 8] подробно изучена деструкция органических красителей в присутствии пероксида водорода с участием коммерческой пероксидазы хрена. Однако следует учитывать, что стоимость коммерческой пероксидазы достаточно высока, поскольку процедуры её выделения и очистки требуют дополнительных затрат, и это является существенным недостатком [9]. В связи с этим изучение применения растительных пероксидаз является актуальной задачей. В работе [10] для сравнительной оценки проводилась экстракция пероксидазы из различных растительных объектов: кабачков, репы, капусты, редиса красного, цветной капусты и картофеля. Авторы показали, что среди овощей наибольшая активность наблюдается у пероксидазы репы (*Brassica rapa*) в реакции обесцвечивания азокрасителя Конго красный. В оптимизированных условиях удалось достигнуть полного обесцвечивания реакционной смеси через 16 мин. Встречаются публикации с использованием для различных целей пероксидазы из менее изученных растительных объектов, таких как табак [11, 12], сладкий картофель [13], стебли брокколи [14], краснокочанная капуста [15], цитрусовые растения [16]. Ранее

нами была изучена ферментативная реакция красителя бромфенолового синего с пероксидом водорода в присутствии коммерческого препарата пероксидазы, а также пероксидазы, экстрагированной из корней хрена [17].

Чаще всего для деструкции органических поллютантов используется коммерческий препарат пероксидазы либо пероксидаза, предварительно экстрагированная из частей различных растений. Представляет интерес сокращение стадии экстракции в процессе подготовки фермента для ферментативной деструкции органических веществ, однако такие публикации нам неизвестны.

Целью настоящей работы являлась оценка потенциала отходов различных овощей как источников пероксидазы, используемой в процессе обесцвечивания раствора бромфенолового синего в присутствии пероксида водорода, без необходимости выделения ферментного комплекса из состава овоща.

Материалы и методы

В данной работе в качестве источника пероксидазы использовали отходы корнеплодов хрена (*Armoracia rusticana*), редиса (*Raphanus sativus* var. *radicula*), дайкона (*Raphanus sativus* subsp. *acanthiformis*), редьки черной (*Raphanus sativus* 'Niger'), репы желтой (*Brassica napobrassica*), редьки зеленой (*Raphanus*) и кочерыжку капусты белокочанной (*Brassica capitata*). Для экспериментов использовали счищенную кожуру овощей, предварительно промытых дистиллированной водой от остатков почвы.

В качестве модельного красителя использовали бромфеноловый синий (БФС, регистрационный номер CAS 115-39-9) квалификации «ч.д.а.» без дополнительной очистки.

Обесцвечивание раствора красителя осуществляли при температуре 24°C и pH 4,01 (фталатный буферный раствор). В водный раствор объемом 25 мл БФС с концентрацией 25,1 мкМ помещали 0,5 г кожуры корнеплодов одного из овощей. Реакцию инициировали добавлением 0,1 мл 0,1 М раствора пероксида водорода. После перемешивания регистрировали спектры поглощения в интервале длин волн 350–700 нм с использованием спектрофотометра Specord Analytik Jena 200 plus.

Эффективность удаления красителя (Э), определяли по формуле:

$$\text{Э} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \cdot 100\% ,$$



где C_0 – начальная концентрация красителя, C_t – концентрация красителя в момент времени t .

Концентрацию красителя определяли по оптической плотности раствора в максимуме поглощения $\lambda = 592$ нм, $l = 1$ см, используя значение $\epsilon_{592} = 3,4 \cdot 10^4$ л/моль·см.

Для проведения исследований при повышенных температурах использовали лабораторный термостат суховоздушный ТС-1/20 СПУ.

Результаты и их обсуждение

Для оценки вклада возможных сорбционных процессов в обесцвечивание раствора красителя процесс осуществляли в присутствии только растительных материалов без участия пероксида водорода. Через 2 ч процесса в присутствии отходов корнеплодов репы степень обесцвечивания БФС составила 10%, хрена и капусты – 7%, дайкона

и редьки черной – 4%, редиса, редьки зеленой – 1%, эти значения соответствуют максимальной адсорбции красителя на поверхности кожуры овощей, которая впоследствии не изменялась в течение трех суток.

В присутствии пероксида водорода и фермента, содержащегося в кожуре корня хрена, наблюдалось значительное уменьшение интенсивности поглощения раствора БФС при длине волны 592 нм, как показано на рис. 1. Это соответствует снижению концентрации красителя в его водном растворе.

На рис. 2 показано снижение интенсивности поглощения раствора БФС в присутствии пероксида водорода и отходов капусты. Эффективность обесцвечивания красителя в присутствии отходов всех изученных овощей представлена в табл. 1.

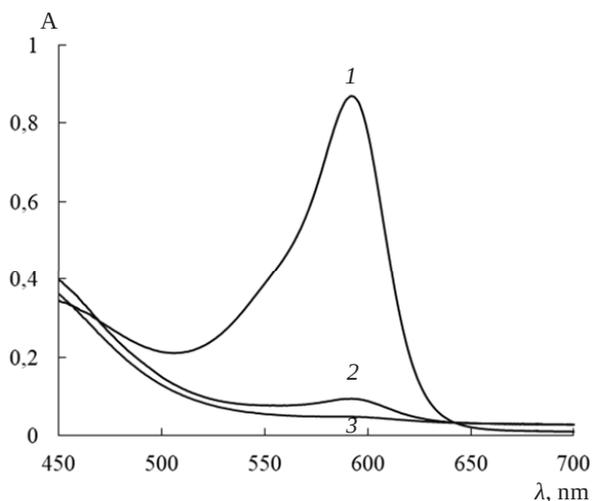


Рис. 1. Спектры поглощения раствора БФС 25,1 мкМ в присутствии отходов хрена, m (отходов) = 0,5 г, $C(H_2O_2) = 0,4$ мМ, $t = 24$ °С, pH 4,01 за различное время реакции, мин: 1 – исходный; 2 – 1; 3 – 10

Fig. 1. UV-vis spectra of aqueous Bromophenol blue dye solution 25,1 μ M in the presence of horseradish waste, m (waste) = 0,5 g, $C(H_2O_2) = 0,4$ mM, $t = 24$ °C, pH 4,01 for different reaction times, min: 1 – original; 2 – 1; 3 – 10

Из табл. 1 видно, что фермент, содержащийся в кожуре корнеплодов разных овощей, в сочетании с пероксидом водорода катализирует обесцвечивание водного раствора БФС с различной эффективностью. При использовании пероксидазы хрена окисление протекает наиболее эффективно, примерно 95% красителя обесцвечивается в течение 10 мин. В присутствии кожуры редьки черной обесцвечивание раствора красителя также протекало достаточно быстро, тогда как

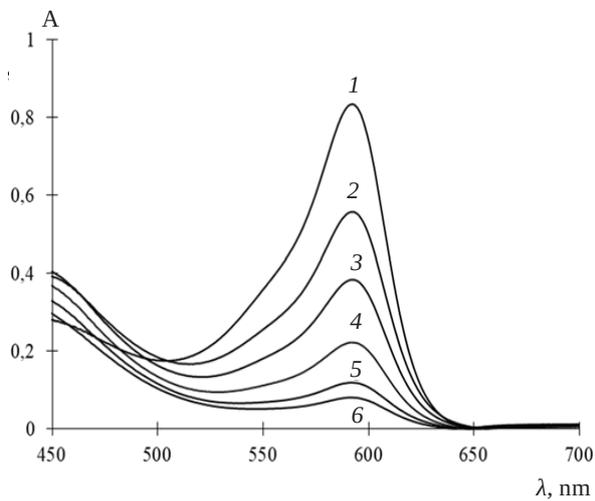


Рис. 2. Спектры поглощения раствора БФС 25,1 мкМ в присутствии отходов капусты, m (отходов) = 0,5 г, $C(H_2O_2) = 0,4$ мМ, $t = 24$ °С, pH 4,01 за различное время реакции, мин: 1 – исходный; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 30; 5 – 60; 6 – 180

Fig. 2. UV-vis spectra of aqueous Bromophenol blue dye solution 25,1 μ M in the presence of cabbage waste, m (waste) = 0,5 g, $C(H_2O_2) = 0,4$ mM, $t = 24$ °C, pH 4,01 for different reaction times, min: 1 – original; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 30; 5 – 60; 6 – 180

отходы дайкона и редиса позволяли достигнуть сопоставимого эффекта лишь через трое суток.

Для характеристики ферментативных реакций обычно применяют максимальную скорость V_m и константу Михаэлиса K_M . Для расчета данных величин определяли зависимость начальной скорости реакции от концентрации субстрата, при этом концентрацию бромфенолового синего в растворе варьировали от 10,2 до 53,2 мкМ при постоянных значениях кон-



Таблица 1 / Table 1

Степень обесцвечивания БФС в присутствии растительных отходов:
 $C(\text{БФС}) = 25,1 \text{ мкМ}$, $C(\text{H}_2\text{O}_2) = 0,4 \text{ мМ}$, $m(\text{отходов}) = 0,5 \text{ г}$, $\text{pH } 4,01$, $t = 24^\circ\text{C}$
The degree of decolorization of Bromophenol blue dye in the presence of plant waste:
 $C(\text{BPB}) = 25,1 \text{ }\mu\text{M}$, $C(\text{H}_2\text{O}_2) = 0,4 \text{ mM}$, $m(\text{waste}) = 0,5 \text{ g}$, $\text{pH } 4,1$, $t = 24^\circ\text{C}$

Овощная культура Vegetable culture	Время, t Time, t	Степень удаления, % Degree of removal, %
Хрен <i>Armoracia rusticana</i>	10 мин / min	95
Черная редька <i>Raphanus sativus 'Niger'</i>	1 ч / h	88
Редис <i>Brassica napobrassica</i>	3 ч / h	73
Капуста <i>Brassica capitata</i>	3 ч / h	76
Зеленая редька <i>Raphanus</i>	1 сутки / day	50
Дайкон <i>Raphanus sativus</i>	3 суток / days	68
Редис <i>Raphanus sativus var. radicola</i>	3 суток / days	73

центрации пероксида водорода, массы отходов овощей и pH. Параметры ферментативной реакции определялись методом линеаризации уравнения Михаэлиса – Ментен в координатах Лайнуивера – Берка. Для учета возможных раз-

личий, связанных со степенью зрелости, особенностями хранения, сортовыми различиями овощных культур определяли параметры процесса деструкции с использованием трех различных образцов овощей. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Кинетические параметры ферментативной деколоризации раствора БФС в присутствии растительных отходов: $C(\text{H}_2\text{O}_2) = 0,4 \text{ мМ}$, $m(\text{отходов}) = 0,5 \text{ г}$, $\text{pH } 4,01$, $t = 24^\circ\text{C}$
Kinetic parameters of enzymatic decolorization of Bromophenol blue dye in the presence of plant waste:
 $C(\text{H}_2\text{O}_2) = 0,4 \text{ mM}$, $m(\text{waste}) = 0,5 \text{ g}$, $\text{pH } 4,01$, $t = 24^\circ\text{C}$

Параметры Parameters	$V_m, \text{ мМ}\cdot\text{мин}^{-1} / V_m, \text{ mM}\cdot\text{min}^{-1}$			$K_M, \text{ мМ} / K_m, \text{ mM}$		
	№ образца / Sample number					
	1	2	3	1	2	3
Хрен / <i>Armoracia rusticana</i>	0,345	0,073	0,021	0,346	0,094	0,097
Черная редька / <i>Raphanus sativus 'Niger'</i>	0,068	0,044	0,105	0,38	0,051	0,183
Капуста / <i>Brassica capitata</i>	0,005	0,031	0,002	0,039	0,709	0,008
Редис / <i>Brassica napobrassica</i>	0,033	0,167	0,046	0,128	0,204	0,086
Зеленая редька / <i>Raphanus</i>	0,001	0,013	0,006	0,04	0,115	0,022
Редис / <i>Raphanus sativus var. radicola</i>	0,009	0,014	0,019	0,281	0,034	0,409
Дайкон / <i>Raphanus sativus</i>	0,011	0,009	0,107	1,68	0,031	0,168



По данным табл. 2 видно, что для хрена максимальная скорость составляет наибольшее значение, для зеленой редьки – наименьшее, что свидетельствует о высокой активности пероксидазы в кожуре корня хрена. Однако следует иметь в виду, что наблюдаемое различие вполне могло возникнуть из-за различного содержания фермента в изученных овощных культурах. Анализ данных табл. 2 показывает, что для каждого овоща параметры процесса деколоризации меняются при применении различных образцов, что, вероятно, объясняется различием условий и времени хранения овощей, а также циклом развития овощных культур [18]. Однако сохраняется закономерность, выявленная ранее: в среднем эффективность использования корня хрена в изучаемом процессе выше эффективности применения растительного материала корнеплодов других овощей. Следовательно, отходы корнеплодов хрена, а также репы и редьки черной могут служить потенциальными источниками пероксидаз, которые способствуют эффективному обесцвечиванию сточных вод.

Известно, что температура – это существенный фактор, оказывающий влияние на скорость ферментативных реакций. Пероксидаза относится к достаточно термоустойчивым ферментам, даже при нагревании до 85°C активность пероксидазы хрена сохраняется на 50% [19]. Изучение зависимости активности пероксидазы, выделенной из топинамбура, от температуры показывает, что максимальная активность фермента проявляется при 30°C [20].

В настоящей работе проводили реакцию ферментативного обесцвечивания красителя в присутствии кожуры редьки черной при различных температурах. Кинетические кривые изменения концентрации бромфенолового синего, полученные при различных температурах, показаны на рис. 3. Следует отметить, что влияние температуры изучали при более высокой концентрации субстрата, чем сопоставление активности различного растительного материала, с целью минимизации влияния концентрационных изменений. Указанная концентрация отвечала выходу графика Михаэлиса – Ментен на плато, параллельное оси абсцисс.

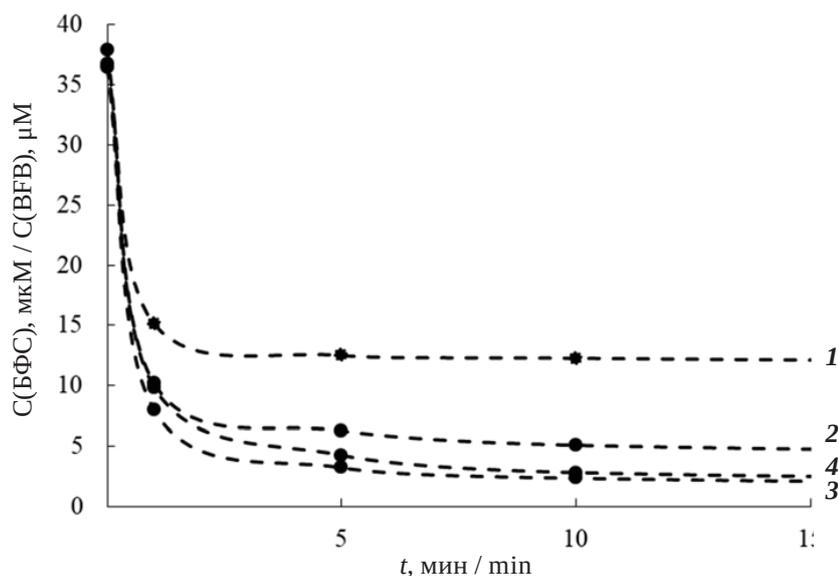


Рис. 3. Кинетические кривые обесцвечивания БФС 37,2 мкМ в присутствии редьки черной, $C(H_2O_2) = 0,4$ мМ, m (отходов) = 0,5 г, pH 4,01 при различных температурах: 1 – 50°C; 2 – 40°C; 3 – 30°C; 4 – 24°C

Fig. 3. Kinetic curves of decolorization of aqueous Bromophenol blue dye solutions 37,2 μM in the presence of black radish, $C(H_2O_2) = 0,4$ mM, m (waste) = 0,5 g, pH 4,01, at different temperatures: 1 – 50°C; 2 – 40°C; 3 – 30°C; 4 – 24°C

Полученные результаты показывают, что при повышении температуры до 40°C ферментативная реакция протекает с высокой эффективностью, при этом степень обесцвечивания красителя

составляет около 95%. При повышении температуры до 50°C степень обесцвечивания БФС уменьшается до 68%, что, по-видимому, связано с разрушением активных центров фермента.



Выводы

Изучена возможность использования отходов различных овощей (кожуры корня хрена, редиса, черной редьки, дайкона, зеленой редьки и кочерыжки капусты) как источника пероксидазы в ферментативной реакции обесцвечивания бромфенолового синего. Окисление протекает с высокой эффективностью при использовании кожуры хрена и редьки черной, в этих случаях удается достигнуть деколоризации водного раствора красителя более чем на 88%, что может стать альтернативой биodeградации.

Определены кинетические параметры изучаемой реакции. Показано, что функционирование ферментного комплекса, содержащегося в кожуре редьки черной, сохраняется при повышении температуры от 23 до 40°C, причем степень удаления красителя достигает 96%.

Список литературы

1. Selvaraj V., Karthika T. S., Mansiya C., Alagar M. An overview of recently developed techniques, mechanisms, and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications // *J. Mol. Struct.* 2021. Vol. 1224. P. 129–195. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129195>
2. Routoula E., Patwardhan S. V. Degradation of anthraquinone dyes from effluents: A review focusing on enzymatic dye degradation with industrial potential // *Environ. Sci. Technol.* 2019. Vol. 54, № 2. P. 647–664. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03737>
3. Singh R. L., Singh P. K., Singh R. P. Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes. A review // *Int. Biodeterior. Biodegradation.* 2015. Vol. 104. P. 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.027>
4. Imran M., Crowley D. E., Khalid A. Microbial biotechnology for decolorization of textile wastewaters // *Environ. Sci. Biotechnol.* 2015. Vol. 14. P. 73–92. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9344-4>
5. Baumer J. D., Valerio A., Guelli Ulson de Souza S. M., Erzinger G. S., Furigo Jr A., Ulsonde Souza A. A. Toxicity of enzymatically decolorized textile dyes solution by horseradish peroxidase // *J. Hazard. Mater.* 2018. Vol. 360. P. 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.102>
6. Sekuljica N. Z., Prlainovic N. Z., Jakovetic S. M., Grbavcic S. Z., Ognjanovic N. D., Knezevic-Jugovic Z. D., Mijin D. Z. Removal of anthraquinone dye by cross-linked enzyme aggregates from fresh horseradish extract // *Clean: Soil, Air, Water.* 2016. Vol. 44. P. 1–10. <https://doi.org/10.1002/clen.201500766>
7. Terres J., Battisti R., Andreus J., Cesar de Jesus P. Decolorization and degradation of Indigo Carmine dye from aqueous solution catalyzed by horseradish peroxidase // *Biocatal. Biotransform.* 2014. Vol. 32, № 1. P. 64–73. <https://doi.org/10.3109/10242422.2013.873416>
8. Farias S., de Oliveira D., Ulson de Souza A. A., Guelli U. de Souza S. M., Morgado F. Removal of reactive blue 21 and reactive red 195 dyes using horseradish peroxidase as catalyst // *Brazil. J. Chem. Eng.* 2017. Vol. 34, № 3. P. 701–707. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20160091>
9. Вяткина О. В. Проблемы выделения и очистки растительных пероксидаз // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2012. Т. 25 (64), № 3. С. 271–276.
10. Ahmedi A., Abouseoud M., Couvert A., Amrane A. Enzymatic degradation of Congo Red by turnip (*Brassica rapa*) peroxidase // *Zeitschrift für Naturforschung.* 2012. Vol. 67, № 7-8. P. 429–436. <https://doi.org/10.5560/ZNC.2012.67c0429>
11. Bania I., Mahanta R. Evaluation of peroxidases from various plant sources // *International Journal of Scientific and Research Publications.* 2012. Vol. 2, iss. 5. P. 1–5.
12. Poloznikov A. A., Zakharova G. S., Chubar T. A., Tishkov V. I., Gazaryan I. G. Site-directed mutagenesis of tobacco anionic peroxidase: Effect of additional aromatic acids on stability and activity // *Biochimie.* 2015. Vol. 115, № 1. P. 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.04.021>
13. Gaspar S., Popescu I. C., Gazaryan I. G., Csöregi E. Biosensors based on novel plant peroxidases: A comparative study // *Electrochimica Acta.* 2000. Vol. 46, № 2-3. P. 255–264. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(00\)00580-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00580-6)
14. Thongsook T., Barrett D. Purification and partial characterization of broccoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) peroxidases // *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 2005. Vol. 53, № 8. P. 3206–3214. <https://doi.org/10.1021/jf048162s>
15. Somtürk B., Kalın R., Özdemir N. Purification of Peroxidase from Red Cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) by Affinity Chromatography // *Applied Biochemistry and Biotechnology.* 2014. Vol. 173, № 7. P. 1815–1828. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-0968-1>
16. Riaz A., Kalsoom U., Bhatti H. N., Jesionowski T., Bilal M. Citrus limon peroxidase-assisted biocatalytic approach for biodegradation of reactive 1847 colfax blue P3R and 621 colfax blue R dyes // *Bioprocess and Biosystems Engineering.* 2023. Vol. 46. P. 443–452. <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02802-z>
17. Соловьева А. А., Фам Т. Ч., Лебедева О. Е., Устинова М. Н. Деструкция бромфенолового синего с участием пероксидазы хрена // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2021. Т. 64, № 1. С. 93–98. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216401.6267>
18. Никитенко А. Н., Егорова З. Е. Изменение активности полифенолоксидазы, аскорбиноксидазы и пероксидазы в процессе хранения яблок // Труды БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2011. № 4. С. 216–219.
19. Щербаков В. Г., Лобанов В. Г., Прудникова Т. Н. Биохимия / под ред. В. Г. Щербакова. 2-е изд. СПб. : ГИОРД, 2003. 440 с.



20. Стенуро М. В., Квитайло И. В., Шутова К. С. Влияние температуры и pH среды на активность пероксидазы, выделенной из топинамбура // Известия вузов. Пищевая технология. 2010. № 1. С. 120–121.

References

- Selvaraj V., Karthika T. S., Mansiya C., Alagar M. An overview of recently developed techniques, mechanisms, and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications. *J. Mol. Struct.*, 2021, vol. 1224, pp. 129–195. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129195>
- Routoula E., Patwardhan S. V. Degradation of anthraquinone dyes from effluents: A review focusing on enzymatic dye degradation with industrial potential. *Environ. Sci. Technol.*, 2019, vol. 54, no. 2, pp. 647–664. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03737>
- Singh R. L., Singh P. K., Singh R. P. Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes. A review. *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 2015, vol. 104, pp. 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.027>
- Imran M., Crowley D. E., Khalid A. Microbial biotechnology for decolorization of textile wastewaters. *Environ. Sci. Biotechnol.*, 2015, vol. 14, pp. 73–92. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9344-4>
- Baumer J. D., Valerio A., Guelli Ulson de Souza S. M., Erzinger G. S., Furigo Jr A., Ulsonde Souza A. A. Toxicity of enzymatically decolorized textile dyes solution by horseradish peroxidase. *J. Hazard. Mater.*, 2018, vol. 360, pp. 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.102>
- Sekuljica N. Z., Prlainovic N. Z., Jakovetic S. M., Grbavcic S. Z., Ognjanovic N. D., Knezevic-Jugovic Z. D., Mijin D. Z. Removal of anthraquinone dye by cross-linked enzyme aggregates from fresh horseradish extract. *Clean: Soil, Air, Water*, 2016, vol. 44, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1002/clen.201500766>
- Terres J., Battisti R., Andreus J., Cesar de Jesus P. Decolorization and degradation of Indigo Carmine dye from aqueous solution catalyzed by horseradish peroxidase. *Biocatal. Biotransform.*, 2014, vol. 32, no. 1, pp. 64–73. <https://doi.org/10.3109/10242422.2013.873416>
- Farias S., de Oliveira D., Ulson de Souza A. A., Guelli U. de Souza S. M., Morgado F. Removal of reactive blue 21 and reactive red 195 dyes using horseradish peroxidase as catalyst. *Brazil. J. Chem. Eng.*, 2017, vol. 34, no. 3, pp. 701–707. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20160091>
- Viatkina O. V. Problems of isolation and purification of plant peroxidases. *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, 2012, vol. 25 (64), no. 3, pp. 271–276 (in Russian).
- Ahmedi A., Abouseoud M., Couvert A., Amrane A. Enzymatic degradation of Congo Red by turnip (*Brassica rapa*) peroxidase. *Zeitschrift für Naturforschung*, 2012, vol. 67, no. 7-8, pp. 429–436. <https://doi.org/10.5560/ZNC.2012.67c0429>
- Bania I., Mahanta R. Evaluation of peroxidases from various plant sources. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2012, vol. 2, iss. 5, pp. 1–5.
- Poloznikov A. A., Zakharova G. S., Chubar T. A., Tishkov V. I., Gazaryan I. G. Site-directed mutagenesis of tobacco anionic peroxidase: Effect of additional aromatic acids on stability and activity. *Biochimie*, 2015, vol. 115, no. 1, pp. 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.04.021>
- Gaspar S., Popescu I. C., Gazaryan I. G., Csöregi E. Biosensors based on novel plant peroxidases: A comparative study. *Electrochimica Acta*, 2000, vol. 46, no. 2-3, pp. 255–264. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(00\)00580-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00580-6)
- Thongsook T., Barrett D. Purification and partial characterization of broccoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) peroxidases. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, vol. 53, no. 8, pp. 3206–3214. <https://doi.org/10.1021/jf048162s>
- Somtürk B., Kalın R., Özdemir N. Purification of Peroxidase from Red Cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata f. rubra*) by Affinity Chromatography. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2014, vol. 173, no. 7, pp. 1815–1828. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-0968-1>
- Riaz A., Kalsoom U., Bhatti H. N., Jesionowski T., Bilal M. Citrus limon peroxidase-assisted biocatalytic approach for biodegradation of reactive 1847 colfax blue P3R and 621 colfax blue R dyes. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2023, vol. 46, pp. 443–452. <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02802-z>
- Solovyeva A. A., Pham T. T., Lebedeva O. E., Ustinova M. N. Horseradish peroxidase catalyzed degradation of bromophenol blue dye. *The Journal ChemChemTech*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 93–98. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216401.6267>
- Nikitenko A. N., Egorova Z. E. Changes in the activity of polyphenol oxidase, ascorbate oxidase and peroxidase during apple storage. *Trudy BGTU. Chemistry, Technology of Organic Compounds and Biotechnology*, 2011, no. 4, pp. 216–219 (in Russian).
- Shcherbakov V. G., Lobanov V. G., Prudnikova T. N. *Biokhimiia. Pod red. V. G. Shcherbakova* [Shcherbakov V. G., ed. Biochemistry. 2nd ed.]. St. Petersburg, GIORD, 2003. 440 p. (in Russian).
- Stepuro M. V., Kvitailo I. V., Shutova K. S. Influence of temperature and pH of the medium on the activity of peroxidase isolated from Jerusalem artichoke. *Izvestiya vuzov. Food Technology*, 2010, no. 1, pp. 120–121 (in Russian).

Поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 24.07.2023; принята к публикации 07.08.2023
The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 24.07.2023; accepted for publication 07.08.2023